

mgr inż. Maciej Piotr Kardas

**ZASADA PARETO W ZARZĄDZANIU JAKOŚCIĄ
Z ZASTOSOWANIEM ZINTEGROWANEGO MODELU
STATYSTYCZNEJ KONTROLI PROCESU I PROJEKTOWANIA
EKSPERYMENTU**

**THE PARETO PRINCIPLE IN QUALITY MANAGEMENT USING AN
INTEGRATED MODEL OF STATISTICAL PROCESS CONTROL AND
DESIGN OF EXPERIMENT**

Rozprawa doktorska napisana pod kierunkiem:
promotor: dr hab. Aleksy Kwiliński, prof. AWSB
promotor pomocniczy: prof. dr hab. Jan Polcyn

OŚWIADCZENIE PROMOTORA ROZPRAWY DOKTORSKIEJ

Oświadczam, że rozprawa doktorska pt. *Zasada Pareto w zarządzaniu jakością z zastosowaniem zintegrowanego modelu statystycznej kontroli procesu i projektowania eksperymentu* autorstwa mgr inż. Macieja Kardasa została przygotowana pod moim kierunkiem i stwierdzam, że spełnia ona warunki do przedstawienia jej w postępowaniu o nadanie stopnia naukowego.

Data*10.04.2025*..... Podpis promotora pracy

Aleksy Kwiliński

Maciej Kardas
Imię i nazwisko doktoranta

Dąbrowa Górnicza, 16.04.2025

OŚWIADCZENIE

Świadom odpowiedzialności prawnej oświadczam, że złożona rozprawa doktorska pt. *Zasada Pareto w zarządzaniu jakością z zastosowaniem zintegrowanego modelu statystycznej kontroli procesu i projektowania eksperymentu* została napisana przeze mnie samodzielnie.

Równocześnie oświadczam, że rozprawa doktorska nie narusza praw autorskich w rozumieniu ustawy z dnia 4 lutego 1994 roku o prawie autorskim i prawach pokrewnych (Dz. U. z 1994 r. nr 24, poz. 83) oraz dóbr osobistych chronionych prawem cywilnym.

Ponadto rozprawa doktorska nie zawiera informacji i danych uzyskanych w sposób nielegalny i nie była wcześniej przedmiotem innych procedur urzędowych związanych z uzyskaniem dyplomów lub tytułów zawodowych uczelni wyższej.

Wyrażam również zgodę na udostępnianie rozprawy doktorskiej bez wynagrodzenia dla celów badawczych lub poznawczych Biblioteki Akademickiej Akademii WSB im. prof. J. Altkorna, z zastrzeżeniem, że udostępnianie to następować będzie wyłącznie na miejscu, w siedzibie Biblioteki.


.....
podpis doktoranta

SPIS TREŚCI

SŁOWNIK.....	10
WSTĘP	15
ROZDZIAŁ 1. WPROWADZENIE	27
1.1. Istota procesu zarządzania jakością	27
1.2. Zarządzanie jakością w procesach produkcyjnych	31
1.3. Koncepcje zarządzania jakością.....	33
1.3.1. Zarządzanie jakością totalną	34
1.3.2. Lean jako system doskonalenia	41
1.3.3. Six Sigma – strategia redukcji zmienności w procesach	46
1.4. Definicje jakości.....	52
1.5. Znaczenie jakości w różnych obszarach funkcjonowania przedsiębiorstwa ...	55
1.6. Wprowadzenie do zasady Pareto.....	58
1.7. Zastosowanie zasady Pareto w zarządzaniu jakością.....	60
1.7.1. Analiza bibliometryczna	63
1.7.2. Ograniczenia realizowanych analiz oraz wnioski.....	72
1.8. Podsumowanie	74
ROZDZIAŁ 2. ANALIZA TEORETYCZNA METOD STATYSTYCZNEJ KONTROLI PROCESU I PROJEKTOWANIA EKSPERYMENTU W OBSZARZE JAKOŚCI.....	77
2.1. Znaczenie statystycznej kontroli procesu.....	77
2.2. Narzędzia statystycznej kontroli procesu	80
2.2.1. Karty kontrolne	82
2.2.2. Histogram.....	93
2.2.3. Diagram Pareto	96
2.2.4. Wykres rozrzutu (punktowy)	99
2.2.5. Diagram przyczynowo-skutkowy	101
2.2.6. Wskaźniki zdolności procesu.....	105
2.3. Rodzaje zmienności w procesach.....	115
2.4. Analiza systemu pomiarowego	121

2.5.	Mapowanie procesu	132
2.6.	Projektowanie eksperymentów	140
2.6.1.	Metody eksperymentowania	142
2.6.2.	Eksperyment pełnoczynnikowy a frakcjonowany – wzajemne ograniczenia	148
2.7.	Podsumowanie.....	155

ROZDZIAŁ 3. INTEGRACJA STATYSTYCZNEJ KONTROLI PROCESU I PROJEKTOWANIA EKSPERYMENTÓW JAKO ADAPTACYJNE PODEJŚCIE DO ZARZĄDZANIA JAKOŚCIĄ 159

3.1.	Integracja SPC i DoE ze strategiami zarządzania jakością w dynamicznych środowiskach produkcyjnych	159
3.2.	Proaktywne podejście do zarządzania jakością poprzez SPC i DoE.....	166
3.3.	Synergiczne zastosowanie SPC, DoE i zasady Pareto w optymalizacji procesów	172
3.4.	Przemysł 4.0: nowoczesne zastosowanie SPC, DoE i zasady Pareto w zarządzaniu jakością	175
3.5.	Podsumowanie.....	185

ROZDZIAŁ 4. OCENA WPŁYWU ZASTOSOWANIA ZASADY PARETO NA OPTYMALIZACJĘ ZARZĄDZANIA JAKOŚCIĄ Z WYKORZYSTANIEM ZINTEGROWANEGO MODELU STATYSTYCZNEJ KONTROLI PROCESU I PROJEKTOWANIA EKSPERYMENTU W ŚWIELE WŁASNYCH BADAŃ EMPIRYCZNYCH...187

4.1.	Problematyka badań	187
4.2.	Przedmiot badania	188
4.3.	Ogólne założenia metodyczne pracy doktorskiej	191
4.4.	Badania empiryczne	196
4.4.1.	Analiza zgodności danych oraz identyfikacja rodzaju problemu i zmienności.....	197
4.4.2.	Analiza systemu pomiarowego	204
4.4.3.	Identyfikacja obszarów budujących zmienność procesu	209
4.4.4.	Projektowanie eksperymentu i ograniczenia wnioskowania.....	220
4.5.	Ograniczenia modelu SPC i DoE w połączeniu z zasadą Pareto	232
4.6.	Podsumowanie.....	235

ZAKOŃCZENIE	237
BIBLIOGRAFIA	245
WYKAZ TABEL.....	269
WYKAZ RYSUNKÓW	270
STRESZCZENIE PRACY W JĘZYKU POLSKIM.....	273
STRESZCZENIE PRACY W JĘZYKU ANGIELSKIM.....	275

SŁOWNIK

8D – *eight disciplines methodology* (raport 8D)

Forma rozwiązywania problemów składająca się z ośmiu etapów, mająca na celu identyfikację, korektę oraz eliminację powtarzających się problemów w procesach produkcyjnych lub usługowych.

AI – *artificial intelligence* (sztuczna inteligencja)

Technologia umożliwiająca maszynom naśladowanie ludzkich zdolności poznawczych, takich jak uczenie się, rozumienie języka, rozpoznawanie obrazów i podejmowanie decyzji.

ANOVA – *analysis of variance* (analiza wariancji)

Metoda statystyczna używana do porównywania średnich w więcej niż dwóch grupach w celu określenia, czy istnieją istotne różnice między nimi.

ASQ – American Society for Quality (Amerykańskie Stowarzyszenie Jakości)

CoV – *coefficient of variation* (współczynnik zmienności)

Miara statystyczna opisująca stosunek odchylenia standardowego do średniej, używana do porównywania zmienności między różnymi zestawami danych.

Cpk – *process capability index* (wskaźnik zdolności rzeczywistej – krótkoterminowej)

Miara rzeczywistej zdolności procesu do produkcji wyrobów w ramach specyfikacji w krótkim okresie.

Cp – *process capability index* (wskaźnik zdolności potencjalnej – krótkoterminowej)

Miara potencjalnej zdolności procesu do produkcji wyrobów w ramach specyfikacji w krótkim okresie.

CUSUM – *cumulative sum control chart* (karta sum skumulowanych)

Narzędzie do statystycznej kontroli procesu, które monitoruje sumę skumulowanych odchyłeń od średniej, wykorzystywane do wykrywania małych zmian w procesie.

DMADV – *define, measure, analyze, design, verify*

Podejście Six Sigma używane jest do projektowania nowych procesów lub produktów na poziomie jakości, składające się z pięciu etapów: definiowania, pomiaru, analizy, projektowania oraz weryfikacji.

DMAIC – *define, measure, analyze, improve, control*

Cykl doskonalenia procesów w podejściu Six Sigma, składający się z pięciu etapów: definiowania, pomiaru, analizy, ulepszenia oraz kontroli.

DoE – *design of experiments* (projektowanie eksperymentów)

Planowanie, prowadzenie, analiza i interpretacja eksperymentów, mająca na celu optymalizację procesów i produktów.

DGK_I – dolna granica kontrolna na karcie I

Dolna granica kontrolna na karcie wartości indywidualnych.

DGK_{MR} – dolna granica kontrolna na karcie MR

Dolna granica kontrolna na karcie ruchomego rozstępu (MR).

DGK_R – dolna granica kontrolna na karcie R

Dolna granica kontrolna na karcie rozstępu (R).

DGK_{Xbar} – dolna granica kontrolna na karcie Xbar

Dolna granica kontrolna na karcie wartości średnich (Xbar).

digital twins (cyfrowe bliźniaki)

Cyfrowe repliki fizycznych obiektów, procesów lub systemów, wykorzystywane do symulacji, analizy i optymalizacji.

edge computing (przetwarzanie brzegowe)

Architektura obliczeniowa, w której przetwarzanie danych odbywa się bliżej źródeł ich generowania, co zmniejsza opóźnienia i obciążenie sieci.

FMEA – *failure mode and effects analysis* (analiza rodzajów i skutków możliwych błędów)

Systematyczne podejście do identyfikacji potencjalnych błędów w procesie, oceny ich skutków oraz wdrażania działań zapobiegawczych.

GGK_I – górna granica kontrolna na karcie I

Górna granica kontrolna na karcie wartości indywidualnych.

GGK_{MR} – górna granica kontrolna na karcie MR

Górna granica kontrolna na karcie ruchomego rozstępu (MR).

GGK_R – górna granica kontrolna na karcie R

Górna granica kontrolna na karcie rozstępu (R).

GGK_{Xbar} – górna granica kontrolna na karcie Xbar

Górna granica kontrolna na karcie wartości średnich (Xbar).

GMP – *good manufacturing practices* (dobre praktyki produkcyjne)

Zestaw standardów i wytycznych dotyczących produkcji, które mają na celu zapewnienie jakości i bezpieczeństwa produktów.

HACCP – *hazard analysis and critical control points* (system analizy zagrożeń i krytycznych punktów kontroli)

System zarządzania bezpieczeństwem żywności, który identyfikuje, ocenia i kontroluje zagrożenia związane z produkcją żywności.

I chart – *individual chart* (karta wartości indywidualnych)

Rodzaj karty kontrolnej używanej do monitorowania pojedynczych pomiarów procesu, bez uwzględniania średnich grup.

IMR chart – *individual-moving range chart* (karta wartości indywidualnych i ruchomego rozstępu)

Rodzaj karty kontrolnej używanej w SPC do monitorowania pojedynczych pomiarów i zmienności między kolejnymi pomiarami.

IoT – *Internet of things* (Internet rzeczy)

Sieć fizycznych urządzeń, pojazdów, urządzeń i innych przedmiotów wyposażonych w elektronikę, oprogramowanie i łączność, które pozwalają na zbieranie i wymianę danych.

JIT – *just-in-time* (dokładnie na czas)

Filozofia zarządzania produkcją, która dąży do minimalizacji zapasów poprzez dostarczanie materiałów dokładnie w momencie ich potrzebowania w procesie produkcyjnym.

KPI – *key performance indicators* (kluczowe wskaźniki wydajności)

Metryki używane do oceny efektywności i sukcesu organizacji w osiągnięciu jej celów.

LM – Lean Manufacturing

Strategia zarządzania skoncentrowana na minimalizacji marnotrawstwa w procesach produkcyjnych przy jednoczesnym maksymalizowaniu wartości dla klienta.

LSS – Lean Six Sigma

Strategia zarządzania jakością, łącząca zasady Lean (minimalizacja marnotrawstwa) oraz Six Sigma (redukcja zmienności i defektów).

LCL – *lower control limit* (dolna granica kontrolna)

Dolna granica kontrolna na karcie kontrolnej, określająca najniższy akceptowalny poziom zmienności procesu.

MSA – *measurement systems analysis* (analiza systemów pomiarowych)

Ocena dokładności, precyzji i stabilności systemów pomiarowych używanych w procesach produkcyjnych.

MR chart – *moving range chart* (karta ruchomego rozstępu)

Rodzaj karty kontrolnej używanej w SPC do monitorowania zmienności procesu poprzez analizę rozstępu między kolejnymi pomiarami.

OFAT – *one factor at a time* (jeden czynnik naraz)

Podejście eksperymentalne polegające na badaniu wpływu jednego czynnika na proces lub wynik, bez zmiany pozostałych.

PDCA – *plan-do-check-act* (planowanie–wykonanie–sprawdzanie–działanie)

Cykl ciągłego doskonalenia używany w zarządzaniu jakością, składający się z etapów planowania, realizacji, sprawdzania i działania.

Pp – *process performance index* (wskaźnik zdolności potencjalnej – długoterminowej)

Miara zdolności procesu do produkcji wyrobów w ramach specyfikacji na przestrzeni długiego czasu.

Ppk – *process capability index* (wskaźnik zdolności rzeczywistej – długoterminowej)

Miara rzeczywistej zdolności procesu do produkcji wyrobów w ramach specyfikacji na przestrzeni długiego czasu.

PRISMA – preferred reporting items for systematic reviews and meta-analyses

Zestaw wytycznych dotyczących raportowania systematycznych przeglądów i meta-analiz, zapewniający ich przejrzystość i rzetelność.

QMS – *quality management systems* (systemy zarządzania jakością)

Zestaw procesów i procedur zarządzania jakością w organizacji, mający na celu ciągłe doskonalenie i satysfakcję klienta.

SPC – *statistical process control* (statystyczna kontrola procesu)

Monitorowanie i kontrola procesów produkcyjnych za pomocą technik i narzędzi statystycznych, takich jak karty kontrolne.

TPM – *total productive maintenance* (całkowite produktywne utrzymanie ruchu maszyn)

Strategia zarządzania utrzymaniem ruchu, której celem jest maksymalizacja dostępności maszyn i urządzeń poprzez prewencyjne utrzymanie.

VSM – *value stream mapping* (mapowanie strumieni wartości)

Narzędzie służące do wizualizacji i analizy przepływu materiałów oraz informacji w procesie produkcyjnym, z naciskiem na eliminację marnotrawstwa.

VOC – voice of the customer (głos klienta)

Proces zbierania i analizy wymagań oraz oczekiwań klientów w celu lepszego dostosowania produktów i usług do ich potrzeb.

WSTĘP

Aktualność tematu

Jakość charakteryzowana jest jako wieloaspektowa koncepcja obejmująca zgodność produktów ze specyfikacjami, spójność procesów produkcyjnych oraz ogólne zaspokojenie potrzeb klientów. Na ewolucję zarządzania jakością znaczący wpływ miał postęp technologiczny w ujęciu Przemysłu 4.0 i wyłaniających się paradygmatów Przemysłu 5.0.¹ Pojęcie jakości nie jest statyczne, lecz silnie związane z dynamicznym procesem, ukierunkowanym na integrację w wielu płaszczyznach – zarówno w obszarze ludzkim, jak i technologicznym, co przekłada się na wzrost wydajności operacyjnej, definiowanej jako zdolność do maksymalizacji produktywności przy minimalnym wykorzystaniu zasobów i redukcji marnotrawstwa². Obejmuje stosunek uzyskanej produkcji do włożonych zasobów, podkreślając optymalizację procesów i wykorzystania zasobów w celu zwiększenia przewagi konkurencyjnej³.

Przejście od tradycyjnej kontroli jakości, reprezentującej podejście reaktywne do nowoczesnych systemów zarządzania jakością, odzwierciedla szersze rozumienie jakości jako koncepcji holistycznej. Współcześnie angażuje ona wszystkie zainteresowane strony

¹ R. Miśkiewicz, R. Wolniak, *Practical application of the Industry 4.0 concept in a steel company*, „Sustainability” 2020, vol. 12, no. 14, 5776; A. Rehman, T. Umar, *Literature review: Industry 5.0. Leveraging technologies for environmental, social and governance advancement in corporate settings*, „Corporate Governance: The International Journal of Business in Society” 2024, vol. 25, no. 2, s. 229–251; A. Kister, V. Vovk, J. Polcyn, *Application of artificial intelligence in health care*, „Annales Universitatis Apulensis Series Oeconomica” 2023, vol. 25, no. 1, s. 107–116; M. Maciaszczyk, Z. Makiela, R. Miśkiewicz, *Industry 5.0: A new reality, new challenges*, w: *Innovation in the Digital Economy*, pod red. A. Rzepki, Routledge, London 2023, s. 51–61; E. Gross-Golacka [i in.], *Integration of intellectual capital, sustainable development, and Business 5.0*, w: *Innovation in the Digital Economy*, pod red. A. Rzepki, Routledge, London 2023, s. 135–148; Z. Makiela, T. Kusio, *Prerequisites of innovativeness in industry 4.0*, w: *Sustainability, Technology and Innovation 4.0*, pod red. nauk. Z. Makiely, M.M. Stuss, R. Borowieckiego, Routledge, London 2021, s. 47–63; E. Molendowski, K. Nawracaj-Grygiel, M. Ulbrich, *Determinants of Industry 4.0 Readiness in the Manufacturing of the V4 Economies*, „Comparative Economic Research. Central and Eastern Europe” 2024, vol. 27, no. 4, s. 29–46; P. Poszytek, *The landscape of scientific discussions on the competencies 4.0 concept in the context of the 4th industrial revolution – a bibliometric review*, „Sustainability” 2021, vol. 13, no. 12, 6709; A. Kwilinski, O. Vyshnevskiy, H. Dzwigol, *Digitalization of the EU economies and people at risk of poverty or social exclusion*, „Journal of Risk and Financial Management” 2020, vol. 13, no. 7, 142.

² G. Przekota, A. Szczepanska-Przekota, *Application of multi-level analysis in modeling economy productivity*, „Procedia Computer Science” 2023, vol. 225, s. 4860–4869.

³ A.V. Kvasiko, L. Shenderivs'ka, *Efficiency of the Enterprise's Operating Activity and Its Evaluation*, „Naukovyj visnyk Kherson s' koho derzhavnoho universytetu” 2022, vol. 46, s. 16–22; M.B. Zuev, B.P. Zuev, I.N. Bulgakova, *The formation and development of the performance assessment method in the conception of operational management*, „Бизнес-информатика” 2020, vol. 14, no. 1, s. 75–84.

w procesie produkcji – od wyboru surowców po dostawę produktu końcowego, intensyfikując proaktywizm⁴.

Integracja technologii wpisanych w ramy Przemysłu 4.0, takich jak Internet rzeczy, analiza dużych zbiorów danych czy sztuczna inteligencja, zmienia dotychczasowe podejście do zarządzania jakością⁵. W rezultacie możliwe jest monitorowanie procesu produkcyjnego w czasie rzeczywistym, a także podejmowanie decyzji na podstawie zebranych danych. Przykładowo wdrożenie statystycznej kontroli procesu (SPC) i analityki predykcyjnej pozwala na wczesne wykrywanie potencjalnych problemów, minimalizując w ten sposób straty, a także zwiększając ogólną wydajność. Dodatkowo zastosowanie cyfrowych bliźniaków przyczynia się do poprawy dokładności oceny jakości, a także ułatwia ciągłe doskonalenie procesów⁶.

Luka badawcza

W literaturze naukowej nie przeprowadzono pogłębionych badań integrujących zasadę Pareto, statystyczną kontrolę procesu (SPC) oraz projektowanie eksperymentu (DoE) w ramach jednego spójnego modelu. Dotychczasowe prace koncentrują się głównie na ich odrębnym stosowaniu, co limituje możliwość zrozumienia złożonych zależności przyczynowo-skutkowych oraz praktycznego wykorzystania. Badania dotyczące równoległego zastosowania podejść są nieliczne i mają przeważnie charakter ogólny, nie dostarczając szczegółowych wskazówek dotyczących analizy wyników czy formułowania konkretnych wniosków⁷. Ponadto wiele dotychczasowych opracowań ogranicza się do rozważań teoretycznych, z niedostatecznym uwzględnieniem danych empirycznych pochodzących z rzeczywistych studiów przypadku. Choć istnieje bogaty dorobek naukowy dotyczący skutecznego wdrożenia SPC i DoE w różnych sektorach przemysłowych, wciąż brakuje badań uwzględniających ich zintegrowane zastosowanie

⁴ E. Baran, T. Korkusuz Polat, *Classification of Industry 4.0 for Total Quality Management: A review*, „Sustainability” 2022, vol. 14, no. 6, 3329.

⁵ R. Miskiewicz, *Internet of things in marketing: Bibliometric analysis*, „Marketing and Management of Innovations” 2020, no. 3, s. 371–381; O. Melnychenko, *Is artificial intelligence ready to assess an enterprise's financial security?*, „Journal of Risk and Financial Management” 2020, vol. 13, no. 9, 191; Y. Kharazishvili, A. Kwilinski, *Methodology for determining the limit values of national security indicators using artificial intelligence methods*, „Virtual Economics” 2022, vol. 5, no. 4, s. 7–26.

⁶ X. Zhu, Y. Ji, *A digital twin-driven method for online quality control in process industry*, „The International Journal of Advanced Manufacturing Technology” 2022, s. 3045–3064.

⁷ M. Tanco, E. Viles, L. Pozueta, *Are All Designs of Experiments Approaches Suitable for Your Company?*, w: *Proceedings of the World Congress on Engineering*, 2008, vol. 2; J. Kechagias, K. Kitsakis, N. Vaxevanidis, *Comparison of Full versus Fractional Factorial Experimental Design for the prediction of Cutting Forces in Turning of a Titanium alloy: A case study*, „International Journal of Materials” 2017, vol. 4, s. 1–4.

w kontekście systematycznego zarządzania jakością⁸. Zasada Pareto, szeroko omawiana w literaturze jako narzędzie identyfikacji istotnych czynników wpływających na jakość, nie została dostatecznie zaadaptowana w ramach modeli uwzględniających integrację SPC i DoE⁹.

Zintegrowanie zasady Pareto z SPC i DoE zapewnia bardziej wszechstronne zrozumienie oraz minimalizację źródeł zmienności w procesach produkcyjnych. W efekcie możliwe jest dokładniejsze zidentyfikowanie zmiennych mających największy wpływ na jakość produktu oraz określenie efektywnych metod ich optymalizacji. Ponadto niemal równoległe prowadzenie eksperymentów i monitorowanie procesu sprzyja szybszemu oraz bardziej skutecznemu wdrażaniu usprawnień i działań korygujących.

Zasada Pareto w ramach modelu ustanawia ramy w odniesieniu do wagi poszczególnych czynników budujących jakość analizowanego procesu, umożliwiając uporządkowanie działań naprawczych i optymalizacyjnych poprzez skupienie się na najistotniejszych przyczynach problemów¹⁰.

Filarem SPC są karty kontrolne, które pełnią istotną funkcję zarówno w monitorowaniu, jak i doskonaleniu procesów¹¹. Podstawą ich działania jest szybkie wykrywanie niezgodności oraz określanie rodzaju zmienności. Karty kontrolne pozwalają również utrzymać stabilność procesów poprzez ustalanie odpowiednich granic kontrolnych. W przypadku kart Shewharta limity wyznacza się na poziomie trzech odchyłeń standardowych od średniej.

DoE polega na manipulowaniu zmiennymi wejściowymi, aby zbadać ich wpływ na mierzoną zmienną odpowiedzi. Głównym założeniem jest wyodrębnienie czynników statystycznie istotnych w aspekcie zarządzania jakością procesu.

⁸ E. Bottani [i in.], *Statistical Process Control of assembly lines in a manufacturing plant: Process Capability assessment*, „Procedia Computer Science” 2021, vol. 180, s. 1024–1033; P. Qiu, *Statistical Process Control Charts as a Tool for Analyzing Big Data*, w: *Big and Complex Data Analysis: Methodologies and Applications*, pod red. nauk. S.E. Ahmeda, Springer, 2017, s. 123–138; S.P. Jadhav, S.H. Sawant, *Dry Sliding Behaviour Study of Novel Low-metallic Friction Materials by using DoE-Taguchi Method*, „International Journal of Engineering” 2024, vol. 37, no. 3, s. 452–459.

⁹ A. Shabrawy, *The Application of Pareto Distribution Principle to Quality Control in repair workshops*, w: *International Conference on Applied Mechanics and Mechanical Engineering*, May 1986, vol. 1, s. 31–39; D. Radson, A.H. Boyd, *The Pareto Principle and Rate Analysis*, „Quality Engineering” 1997, vol. 10, s. 223–229.

¹⁰ A. Shabrawy, *The Application...*, s. 31–39.

¹¹ D. Montgomery, C. Borror, *Systems for modern quality and business improvement*, „Quality Technology & Quantitative Management” 2017, vol. 14, s. 343–352.

Cel główny analizy

Głównym celem analizy prowadzonej w ramach rozprawy doktorskiej jest ocena skuteczności zastosowania zasady Pareto w połączeniu z integralnym modelem statystycznej kontroli procesu oraz projektowania eksperymentu w zarządzaniu jakością procesów produkcyjnych.

Sformułowanie problemu badawczego

W nawiązaniu do powyższych ustaleń problem badawczy został sformułowany następująco:

Jaki jest wpływ zastosowania zasady Pareto w połączeniu z integralnym modelem statystycznej kontroli procesu i projektowania eksperymentu na zarządzanie jakością procesów produkcyjnych?

Przedmiot badania i zakres rozprawy

Przedmiotem badania jest analiza skuteczności zastosowania zasady Pareto w zarządzaniu jakością procesów produkcyjnych w połączeniu ze zintegrowanym modelem obejmującym statystyczną kontrolę procesu oraz projektowanie eksperymentu. Badania koncentrują się na ocenie wpływu tych narzędzi na ograniczanie zmienności parametrów procesowych oraz optymalizację jakości wyrobów.

Dane do analizy pochodziły z procesu wytwarzania farby jednoskładnikowej, realizowanego w przedsiębiorstwie sklasyfikowanym jako duże, zgodnie z wytycznymi Komisji Europejskiej. Przedsiębiorstwo to spełnia kryteria zatrudnienia powyżej 250 pracowników, rocznego obrotu przekraczającego 60 milionów euro lub sumy bilansowej powyżej 50 milionów euro¹².

Zakres rozprawy obejmuje zarówno teoretyczne podstawy zastosowania zasady Pareto w zintegrowanym podejściu do zarządzania jakością, jak i praktyczne wdrożenie tego rozwiązania w rzeczywistym środowisku produkcyjnym, z naciskiem na ocenę skuteczności i możliwości optymalizacji parametrów procesowych.

Studium przypadku skoncentrowane było na ograniczeniu zmienności w procesie produkcyjnym, gdzie kluczowym aspektem jakości była lepkość dynamiczna. Utrzymanie parametru w wyznaczonych granicach specyfikacji stanowiło warunek

¹² Dyrektywa Delegowana Komisji (UE) 2023/2775 z dnia 17 października 2023 r, https://eur-lex.europa.eu/legal-content/PL/TXT/?uri=OJ%3AL_202302775.

dostosowania produktu do przyjętych wymagań odbiorców. Ze względu na zbyt szeroki zakres otrzymywanych rezultatów konieczne było podjęcie działań mających na celu zrozumienie ciągu przyczynowo-skutkowego i ustalenie wpływu czynników oraz interakcji na realizowany proces. Lepkość dynamiczną, definiowaną jako opór przepływu farby, kształtują między innymi szybkość ścinania, temperatura i czas¹³.

Skład farby w sposób istotny wpływa na jej właściwości reologiczne. Obecność zagęstników lub modyfikatorów reologii decyduje o zachowaniu produktu w zróżnicowanych warunkach. Równie ważny pozostaje dobór pigmentów i wypełniaczy wraz z właściwym stężeniem – ze względu na fakt, że zwiększona ilość może powodować wyższą lepkość. Istotną rolę odgrywa także temperatura – jej wzrost zwykle prowadzi do obniżenia lepkości, ułatwiając aplikowanie, choć efekt może się jednak różnić w zależności od składu oraz dodanych substancji modyfikujących.

Etapowy przebieg procesu wytwarzania farb został przedstawiony na rysunku 4.1 pt. *Uproszczony schemat procesu produkcji farby jednoskładnikowej* (s. 190). Kluczowe komponenty receptury, takie jak żywice, rozpuszczalniki, rozcieńczalniki, pigmenty, wypełniacze i dodatki modyfikujące, mają decydujący wpływ na końcowe właściwości, determinując parametry użytkowe oraz zgodność z wymaganiami technologicznymi farby.

W pierwszej fazie dozowane są płynne surowce, takie jak żywice, rozcieńczalniki i rozpuszczalniki. Żywice odpowiadają za przyczepność, trwałość oraz właściwości błonotwórcze farby. W analizowanym przypadku stosowana jest żywica alkidowa. Rozpuszczalniki i rozcieńczalniki regulują lepkość układu, wpływają na czas schnięcia, połysk i siłę krycia.

Kolejno wprowadzany jest zagęstnik, umożliwiający stabilizację farby i nadanie pożądanych właściwości reologicznych. Dodawane pigmenty i wypełniacze odpowiadają za kolor, krycie i trwałość, natomiast proces dyspergowania w disolwerach gwarantuje objętościowe rozprowadzenie cząsteczek w całej dyspersji.

W następnej fazie do układu wprowadzane są środki modyfikujące właściwości użytkowe. Dokładne dozowanie dodatków ma decydujące znaczenie dla osiągnięcia założonych parametrów jakościowych. Ostatni etap stanowi konfekcjonowanie, czyli zlewanie farby, poprzedzone szczegółową kontrolą jakości parametrów, takich jak lepkość, gęstość czy czas schnięcia.

¹³ J. Lisowski, B. Szadkowski, A. Marzec, *Effects of Selected Pigments on the Properties of Silicone Resin-Based Paints*, „Materials” 2022, vol. 15, no. 14, 4961.

W rozprawie doktorskiej zastosowano podejście ilościowe, oparte na zasadzie Pareto, w ramach zintegrowanego modelu statystycznej kontroli procesu i projektowania eksperymentu, którego strukturę przedstawiono na rysunku 4.2 pt. *Schemat integralnego modelu statystycznej kontroli procesu i projektowania eksperymentu z wykorzystaniem zasady Pareto* (s. 193). Zastosowane metody i narzędzia umożliwiają systematyczne monitorowanie oraz kompleksową optymalizację procesów produkcyjnych, ze szczególnym uwzględnieniem zarządzania jakością.

Pierwszym elementem proponowanego rozwiązania jest ocena zgodności danych z przyjętą specyfikacją, realizowana za pomocą kart kontrolnych IMR (*individual-moving range chart*), histogramów oraz wskaźników zdolności procesu. Na podstawie wniosków z analizy podejmowane są dalsze działania monitorujące lub zapobiegawcze (korygujące).

W przypadku gdy wartości procesowe są zgodne z przyjętą specyfikacją, następuje monitorowanie danych procesowych za pomocą kart IMR, a sam proces nie wymaga interwencji. Jeśli wartości przekraczają wyznaczony zakres zmienności, konieczne jest podjęcie dalszych kroków ukierunkowanych na określenie rodzaju problemu, z wykorzystaniem wskaźników zdolności procesu czy analizy rozkładu danych z użyciem histogramu.

Jeżeli rozkład danych wykracza poza przyjęte wartości, ale zmienność procesu jest niewielka, występuje problem położenia. Działania naprawcze skupiają się wówczas na identyfikacji i usunięciu zewnętrznej przyczyny przesunięcia procesu lub na dostosowaniu jego parametrów czy ustawień.

Gdy rozkład danych jest względnie wypośrodkowany, natomiast część wartości wykracza poza granice specyfikacji, obserwuje się problem zmienności. Konieczne jest określenie jej rodzaju. Jeśli którykolwiek punkt na karcie MR (*moving range chart*) wykracza poza granicę kontrolną, oznacza to zmienność specjalną, zwykle wywołaną przez czynnik zewnętrzny, co wymaga natychmiastowych działań naprawczych. Jeżeli wszystkie punkty mieszczą się w wyznaczonych granicach, zmienność ma charakter naturalny. W takim przypadku należy najpierw zrozumieć ciąg przyczynowo-skutkowy procesu, ponieważ podjęcie natychmiastowej reakcji może zwiększyć zmienność i pogłębić problem.

Po ustaleniu rodzaju zmienności niezbędna jest weryfikacja systemu pomiarowego (MSA) w celu zapewnienia prawidłowego zbierania danych. System pomiarowy powinien charakteryzować się zdecydowanie mniejszą zmiennością niż sam proces.

Analiza MSA, wykorzystująca karty kontrolne Xbar-R, pozwala ocenić rozdzielczość, powtarzalność oraz odtwarzalność operatorów. Jeżeli system pomiarowy nie spełnia wymagań, należy przerwać analizę i wprowadzić niezbędne korekty przed kontynuowaniem dalszego procesu badawczego.

W przypadku gdy system pomiarowy spełnia wymagania, kolejnym krokiem jest identyfikacja obszaru mającego największy wpływ na zmienność naturalną procesu. W tym celu wykorzystuje się analizę ukierunkowaną na identyfikację dominującego źródła zmienności. Stosowane są metody praktyczne (*box plot*), graficzne (karty kontrolne Xbar) i ilościowe (analiza rozkładu zmienności).

Obszar o największej zmienności determinuje dobór czynników podlegających dalszym badaniom w ramach projektowania eksperymentu. Istotne znaczenie ma właściwe określenie poziomów testowania. Wyniki uzyskane w DoE stanowią podstawę do identyfikacji efektów głównych i interakcji między czynnikami, co daje możliwość pełnego zrozumienia ciągu przyczynowo-skutkowego analizowanego procesu.

Hipotezy badawcze

Na podstawie głównego celu analizy sformułowano **hipotezy badawcze**, które stanowią fundament przeprowadzonych badań.

Hipoteza 1: Implementacja zasady Pareto, opisującej uniwersalną prawidłowość wskazującą na koncentrację kluczowych czynników mających największy wpływ na wynik, w połączeniu z integralnym modelem statystycznej kontroli procesu oraz projektowania eksperymentu, przyczynia się do optymalizacji zarządzania jakością w procesach produkcyjnych poprzez identyfikację oraz skuteczną kontrolę głównych źródeł zmienności.

Hipoteza 2: Rozdzielczość, precyzja systemu pomiarowego oraz zastępowalność operatorów prowadzą do poprawy trafności podejmowanych decyzji.

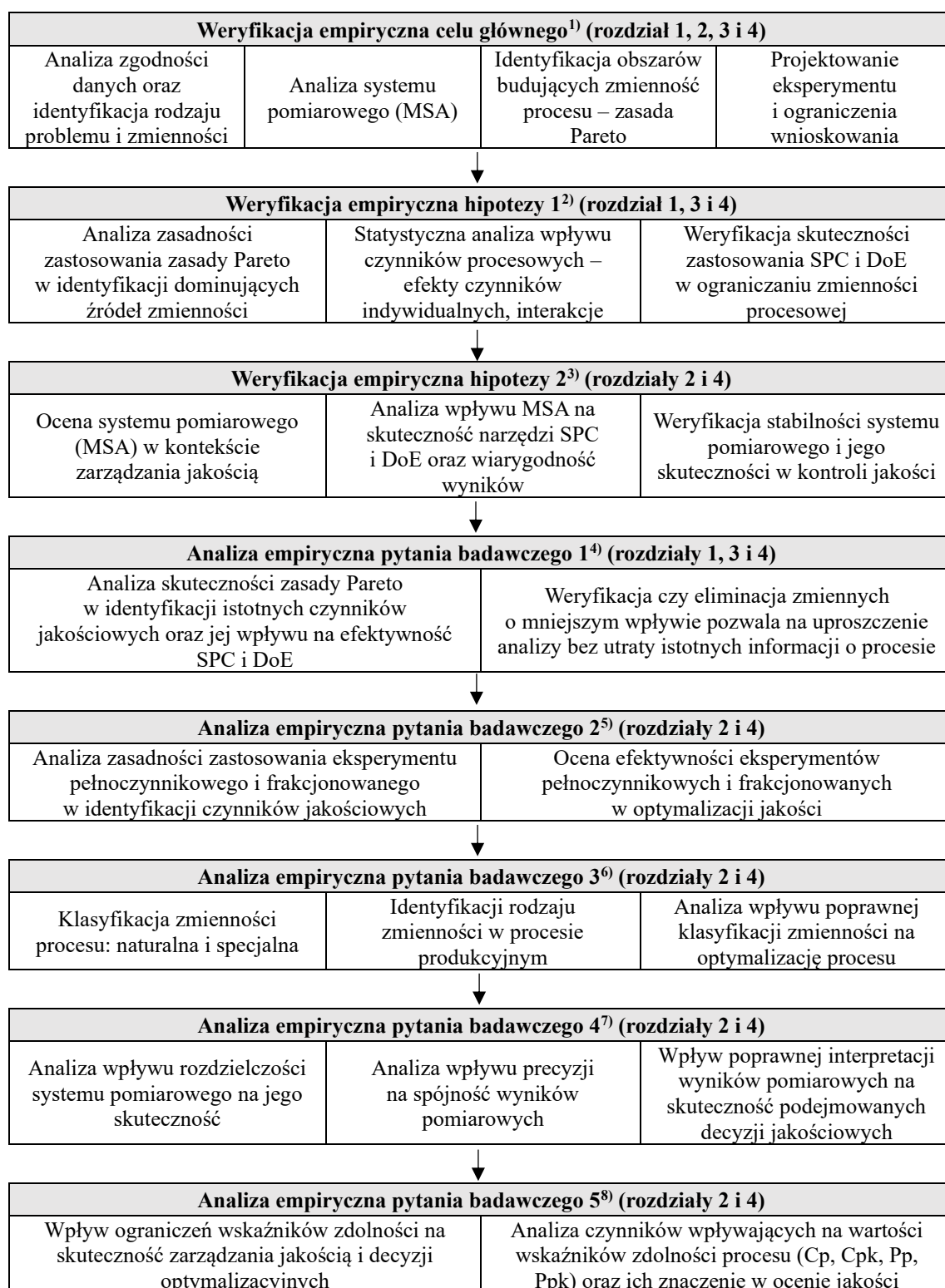
Pytania badawcze

Dotychczasowy dorobek naukowy wskazuje na wielowymiarowość podejmowanej tematyki, co wymaga pogłębionej analizy. Pomimo licznych badań w literaturze wciąż istnieją kwestie, które nie zostały wystarczająco opisane, stwarzając tym samym pole do dalszych badań. Sformułowane pytania badawcze pozwolą wypełnić pojawiające się luki w wiedzy.

- 1) Jakie jest oddziaływanie w ujęciu zastosowania zasady Pareto w zintegrowanym modelu statystycznej kontroli procesu i projektowaniu eksperymentu na identyfikację kluczowych czynników budujących jakość produktów w procesie produkcyjnym?
- 2) Jakie są różnice w skuteczności eksperymentu pełnoczynnikowego oraz frakcjonowanego w warstwie identyfikacji czynników wpływających na jakość produktów?
- 3) Jakie znaczenie dla jakości ma odpowiednia identyfikacja rodzaju zmienności procesu?
- 4) Jak rozdzielczość systemu pomiarowego oraz precyzja laborantów wpływają na wiarygodność wyników pomiarowych w zarządzaniu jakością?
- 5) Jakie są ograniczenia dla wskaźników zdolności potencjalnej procesu: *process capability* (C_p), *process performance* (P_p) oraz wskaźników zdolności rzeczywistej: *process capability index* (C_{pk}), *process performance index* (P_{pk}) w warstwie zarządzania jakością i ich wpływ na doskonalenie procesów produkcyjnych?

Ideogram koncepcji badań ukazuje kolejne etapy realizacji pracy oraz ich wzajemne powiązania. Struktura porządkuje istotne zagadnienia badawcze, a także ilustruje sposób ich empirycznej weryfikacji (rysunek W.1).

Rysunek W.1. Ideogram badań



Źródło: opracowanie własne na podstawie przyjętych założeń badawczych

Legenda – ideogram badań (rysunek W.1)

- 1) Cel główny: Głównym celem analizy prowadzonej w ramach rozprawy doktorskiej jest ocena skuteczności zastosowania zasady Pareto w połączeniu z integralnym modelem statystycznej kontroli procesu oraz projektowania eksperymentu w zarządzaniu jakością procesów produkcyjnych.
- 2) Hipoteza 1: Implementacja zasady Pareto, opisującej uniwersalną prawidłowość wskazującą na koncentrację kluczowych czynników mających największy wpływ na wynik, w połączeniu z integralnym modelem statystycznej kontroli procesu oraz projektowania eksperymentu, przyczynia się do optymalizacji zarządzania jakością w procesach produkcyjnych poprzez identyfikację oraz skuteczną kontrolę głównych źródeł zmienności.
- 3) Hipoteza 2: Rozdzielczość, precyzja systemu pomiarowego oraz zastępowalność operatorów prowadzą do poprawy trafności podejmowanych decyzji.
- 4) Pytanie badawcze 1: Jakie jest oddziaływanie w ujęciu zastosowania zasady Pareto w zintegrowanym modelu statystycznej kontroli procesu i projektowaniu eksperymentu na identyfikację kluczowych czynników budujących jakość produktów w procesie produkcyjnym?
- 5) Pytanie badawcze 2: Jakie są różnice w skuteczności eksperymentu pełnoczynnikowego oraz frakcjonowanego w warstwie identyfikacji czynników wpływających na jakość produktów?
- 6) Pytanie badawcze 3: Jakie znaczenie dla jakości ma odpowiednia identyfikacja rodzaju zmienności procesu?
- 7) Pytanie badawcze 4: Jak rozdzielczość systemu pomiarowego oraz precyzja laborantów wpływają na wiarygodność wyników pomiarowych w zarządzaniu jakością?
- 8) Pytanie badawcze 5: Jakie są ograniczenia dla wskaźników zdolności potencjalnej procesu: *process capability* (Cp), *process performance* (Pp) oraz wskaźników zdolności rzeczywistej: *process capability index* (Cpk), *process performance index* (Ppk) w warstwie zarządzania jakością i ich wpływ na doskonalenie procesów produkcyjnych?

Struktura pracy

Dysertacja składa się z czterech rozdziałów poprzedzonych wstępem. Każdy z rozdziałów zawiera podsumowanie prezentujące najważniejsze ustalenia z analizowanych obszarów. Ostatni element dysertacji stanowi zakończenie, obejmujące rozważania i wyniki badań oraz formułujące końcowe wnioski i rekomendacje.

Rozdział pierwszy – *Wprowadzenie* – pełni funkcję teoretyczną, wprowadzając w problematykę zarządzania jakością. Przedstawiono w nim ewolucję koncepcji zarządzania jakością, od klasycznych modeli, takich jak *total quality management* (TQM), po współczesne strategie Lean i Six Sigma. Podkreślono znaczenie jakości w procesach produkcyjnych, wskazując na ich istotny wpływ. Szczególną uwagę poświęcono zasadzie Pareto jako narzędziu pozwalającemu identyfikować i priorytetyzować działania. Rozdział stanowił podstawę dla zrozumienia, w jaki sposób teoretyczne założenia mogą być zastosowane w praktyce.

W rozdziale drugim – *Analiza teoretyczna metod statystycznej kontroli procesu i projektowania eksperymentu w obszarze jakości* – skoncentrowano się na charakterystyce narzędzi wykorzystywanych w zarządzaniu jakością. W rozdziale przedstawiono obszar statystycznej kontroli procesu, ze szczególnym uwzględnieniem kart kontrolnych, histogramów, diagramów Pareto oraz wskaźników zdolności procesów. Porównano również rodzaje zmienności w procesach, a także wskazano rolę analizy systemów pomiarowych w ocenie prawidłowości danych. Dalsza część rozdziału została poświęcona metodom projektowania eksperymentów, obejmującym szerokie omówienie eksperymentów pełnoczynnikowych i frakcjonowanych.

W rozdziale trzecim – *Integracja statystycznej kontroli procesu i projektowania eksperymentów jako adaptacyjne podejście do zarządzania jakością* – skupiono się na synergicznym zastosowaniu narzędzi SPC, DoE oraz zasady Pareto. Zaprezentowano możliwości ich wzajemnej integracji w środowiskach produkcyjnych, w szczególności w kontekście Przemysłu 4.0, wykorzystując technologie dużych zbiorów danych, sztuczną inteligencję oraz cyfrowe bliźniaki. W rozdziale przeanalizowano także proaktywne strategie zarządzania jakością, które umożliwiają reagowanie na zmienność procesową oraz jej minimalizowanie.

W rozdziale czwartym – *Ocena wpływu zasady Pareto na poprawę zarządzania jakością z wykorzystaniem zintegrowanego modelu statystycznej kontroli procesu i projektowania eksperymentu w świetle własnych badań empirycznych* –

zaprezentowano szczegółową analizę empiryczną opartą na procesie produkcji farby jednoskładnikowej. Rozdział zawiera dokładny opis założeń metodycznych. Wyniki badań wykazały skuteczność zastosowanego podejścia w poprawie jakości produkcji, a także pozwoliły zidentyfikować ograniczenia modelu w praktyce. Podsumowanie rozdziału akcentowało praktyczne implikacje oraz wskazywało na potencjalne kierunki rozwoju zintegrowanego podejścia.

W *Zakończeniu* podsumowano główne wnioski z pracy, podkreślając znaczenie wdrożenia zintegrowanego modelu zarządzania jakością opartego na zasadzie Pareto, SPC i DoE. Wskazano również kierunki dalszych badań, szczególnie w kontekście adaptacji omawianych narzędzi do innych sektorów przemysłowych oraz rozwijających się technologii w ramach Przemysłu 4.0. Praca stanowiła nowatorskie podejście do zarządzania jakością, integrując klasyczne i nowoczesne narzędzia w dynamicznych środowiskach produkcyjnych.

ROZDZIAŁ 1. WPROWADZENIE

1.1. Istota procesu zarządzania jakością

Zarządzanie jakością to złożone zagadnienie obejmujące systematyczne działania mające na celu zapewnienie, że produkty i usługi oferowane przez organizację spełniają określone standardy oraz odpowiadają na zróżnicowane potrzeby klientów. Stanowi integralny element funkcjonowania przedsiębiorstwa zarówno w wymiarze strategicznym, jak i operacyjnym. Wdrożenie efektywnego zarządzania jakością umożliwia budowanie trwałej przewagi konkurencyjnej, optymalizację procesów produkcyjnych oraz wspieranie zrównoważonego rozwoju.

Ewolucja zarządzania jakością była kształtowana przez liczne teorie i praktyki. Początkowo skupiano się na podstawowej kontroli jakości, jednak z czasem rozwinęto zaawansowane strategie, takie jak zarządzanie jakością totalną (TQM), Lean czy Six Sigma. Znaczącą rolę w standaryzacji procesów odegrała implementacja norm ISO, w tym normy ISO 9001, która jest globalnie uznawana jako standard w zakresie zapewnienia jakości produktów i procesów¹⁴. Opiera się ona na podejściu procesowym, zarządzaniu ryzykiem oraz konieczności zaangażowania najwyższego kierownictwa w realizację strategii jakościowej. Koncentracja na kliencie zobowiązuje organizacje do dokładnego określania celów jakościowych, monitorowania efektywności procesów i podejmowania działań korygujących, co prowadzi do spełniania oczekiwań klientów oraz poprawy wydajności operacyjnej¹⁵.

Istotny wkład w rozwój zarządzania jakością wniósł włoski ekonomista Vilfredo Pareto, który zauważył, że bogactwo w społeczeństwie jest rozdzielone nierównomiernie – 80% bogactwa znajduje się w posiadaniu 20% populacji¹⁶. Joseph M. Juran zaadaptował zasadę w obszarze jakości, wskazując, że 20% przyczyn odpowiada za 80% problemów jakościowych¹⁷. Pozwoliło to na identyfikację kluczowych czynników wpływających na jakość i skupienie działań na ich eliminacji. Ponadto wprowadzono

¹⁴ N. Handayani [i in.], *Analysis of implementation of ISO 9001:2015 in SME Aldin Natural Home*, w: *International Conference with 5th ACISE (Annual Conference on Industrial and System Engineering) and World Standard Cooperation Academic Day*, 2018.

¹⁵ S. Sumaedi, M. Yarmen, *The Effectiveness of ISO 9001 Implementation in Food Manufacturing Companies: A Proposed Measurement Instrument*, „Procedia Food Science” 2015, vol. 3, s. 436–444.

¹⁶ V. Pareto, *The New Theories of Economics*, „Journal of Political Economy” 1897, vol. 5, no. 4, s. 485–502.

¹⁷ J.M. Juran, *Juran on Leadership for Quality: An Executive Handbook*, „The Free Press” 1989, s. 28–80.

koncepcję trylogii jakości, obejmującą planowanie, kontrolę oraz doskonalenie jakości¹⁸. Planowanie jakości polega na identyfikacji potrzeb klientów i tworzeniu produktów spełniających te wymagania. Kontrola jakości to monitorowanie i ocena wydajności procesów oraz produktów w celu zapewnienia zgodności ze standardami¹⁹. Doskonalenie jakości odpowiada ciągłej optymalizacji procesów, ukierunkowanej na zwiększanie efektywności poprzez identyfikację i eliminację obszarów wymagających poprawy²⁰. Koncepcja Juran nadaje ramy w aspekcie wykorzystania statystycznej kontroli procesu i projektowania eksperymentu²¹. Podkreślał on również istotę zaangażowania najwyższego kierownictwa w poprawę jakości w organizacji²².

W.E. Deming, kontynuując rozwój koncepcji jakości, w latach 80. XX wieku przedstawił 14 zasad zarządzania, które stały się fundamentem nowoczesnego podejścia do jakości. Jego filozofia określa jakość jako integralny element strategii przedsiębiorstwa ukierunkowanego na długoterminowy sukces²³. Zwracał uwagę na orientację na klienta, rolę przywództwa, zaangażowanie pracowników oraz ciągłe doskonalenie. Filozofia TQM, wynikająca z jego koncepcji, nie jest jedynie zestawem narzędzi, lecz kompleksową strategią wymagającą zmiany kultury organizacyjnej i pełnego zaangażowania wszystkich pracowników²⁴.

Opisując wkład Deminga w rozwój zarządzania jakością, nie sposób pominąć cyklu PDCA (*plan-do-check-act*) – planuj, wykonaj, sprawdź, działaj. Cykl Deminga, mimo że nie jest samodzielną strategią zarządzania jakością, jak TQM, Lean czy Six Sigma, odgrywa kluczową rolę w procesach ciągłego doskonalenia. Jego iteracyjna struktura wspiera systematyczne podejście do optymalizacji procesów i stanowi zasadniczą część koncepcji zarządzania jakością totalną²⁵. Składa się z czterech etapów: planowania, realizacji, sprawdzania i działania. W fazie planowania identyfikuje się możliwości

¹⁸ N. Jabnoun, *Control processes for total quality management and quality assurance*, „Work Study” 2002, vol. 51, no. 4, s. 182–190.

¹⁹ D. Montgomery, C. Borror, *Systems for modern quality...*, s. 343–352.

²⁰ H.M. Judi, D. Genasan, R. Jenal, *Quality Control Implementation in Manufacturing Companies: Motivating Factors and Challenges*, w: *Applications and Experiences of Quality Control*, pod red. nauk. O. Ivanova, IntechOpen, 2011, s. 495–508.

²¹ S. Bisgaard, *Quality management and Juran's legacy*, „Quality and Reliability Engineering International” 2007, vol. 23, no. 6, s. 665–677.

²² J.M. Juran, *Juran on Leadership for Quality...*, s. 28–80.

²³ A. Hughey, *Application of the Deming Philosophy to Higher Education*, „Industry and Higher Education” 2000, vol. 14, s. 40–44; W. Adawiyah, B. Pramuka, Z. Sholikhah, *Deming's Quality Management Practices by Small Businesses in Rural Areas*, „SHS Web of Conferences” 2020, vol. 86, 01030.

²⁴ A. Demir, K. Sertbaş, *Total quality management applications in sports and an application on Kocaeli amateur sports club federation sports clubs*, „SHS Web of Conferences” 2018, vol. 48, 01018.

²⁵ C. Strotmann [i in.], *A Participatory Approach to Minimizing Food Waste in the Food Industry – A Manual for Managers*, „Sustainability” 2017, vol. 9, no. 1, 66.

i obszary wymagające poprawy oraz opracowuje plan wprowadzenia zmian. Realizacja polega na wdrożeniu zaplanowanych działań na ograniczoną skalę, co umożliwia wstępną ocenę ich efektywności. Sprawdzanie to etap oceny wyników wdrożenia, polegający na porównaniu otrzymanych rezultatów z założonymi celami. Ostatni etap obejmuje pełne wdrożenie skutecznych rozwiązań lub korektę planu, jeśli uzyskane wyniki nie spełniają oczekiwań²⁶.

Współczesne zarządzanie jakością jest silnie powiązane z rozwojem technologii cyfrowych, określanym mianem Przemysłu 4.0, czyli czwartej rewolucji przemysłowej. Charakteryzuje się ona integracją takich technologii jak sztuczna inteligencja (*artificial intelligence*, AI) czy Internet rzeczy (*Internet of things*, IoT) z procesami produkcyjnymi, co transformuje sposób funkcjonowania organizacji²⁷. Sukces cyfrowej transformacji przedsiębiorstw zależy od wdrażania zwinnych, procesowo ukierunkowanych podejść wykorzystujących narzędzia cyfrowe i analitykę danych²⁸. Kluczowym celem jest dostosowanie strategii organizacyjnych do dynamicznie zmieniających się potrzeb klientów i warunków rynkowych poprzez proaktywne przewidywanie potencjalnych problemów i podejmowanie działań zapobiegawczych²⁹. Integracja zaawansowanych technologii z tradycyjnymi narzędziami zarządzania jakością zwiększa możliwości gromadzenia i analizy dużych ilości danych, co daje możliwość podejmowania bardziej świadomych decyzji³⁰.

Strategie takie jak Lean i Six Sigma odgrywają istotną rolę w zarządzaniu jakością, wprowadzając ustrukturyzowane podejście do doskonalenia procesów. Lean koncentruje się na eliminacji marnotrawstwa i optymalizacji przepływu wartości, podczas gdy Six Sigma wykorzystuje analizę statystyczną do minimalizowania zmienności procesowej

²⁶ P. Hortolà, *An ergonomic format for short reporting in scientific journals using nested tables and the Deming's cycle*, „Journal of Information Science” 2007, vol. 34, no. 2, s. 207–212.

²⁷ J. Butt, *A Conceptual Framework to Support Digital Transformation in Manufacturing Using an Integrated Business Process Management Approach*, „Designs” 2020, vol. 4, no. 3, 17.

²⁸ B.O. Kose, *Agile Business Analysis for Digital Transformation*, w: *Handbook of Research on Multidisciplinary Approaches to Entrepreneurship, Innovation, and ICTs*, pod. red. nauk. L.C. Carvalho, et al., IGI Global, 2021, s. 98–123; M.K. Angelopoulos, Y.A. Pollalis, *Change Management via Data Analytics for a Successful Lean Transformation of Public Companies*, „Archives of Business Research” 2021, vol. 9, no. 12.

²⁹ M. Zieja, H. Smoliński, P. Gołda, *Proactive methods – new quality in aircraft flight safety management*, „Journal of KONBiN” 2015, vol. 36, s. 105–114; A. Aljohani, *Predictive analytics and machine learning for real-time supply chain risk mitigation and agility*, „Sustainability” 2023, vol. 15, no. 20, 15088.

³⁰ S.H. Park, S.M. Dhalgaard-Park, D.C. Kim, *New Paradigm of Lean Six Sigma in the 4th Industrial Revolution Era*, „Quality Innovation Prosperity” 2020, vol. 24, no. 1, s. 1–16.

i podnoszenia jakości produktów³¹. Wykorzystanie tych filozofii pozwala organizacjom na zwiększenie efektywności operacyjnej oraz lepsze zaspokajanie potrzeb klientów.

Kluczową rolę w efektywnym zarządzaniu jakością odgrywa przywództwo. Efektywni liderzy kształtują kulturę organizacyjną zorientowaną na jakość, motywując pracowników i angażując się bezpośrednio w inicjatywy na rzecz jej poprawy³². Ważne jest, aby każdy członek organizacji rozumiał swoją rolę w osiąganiu celów jakościowych. Strategiczne podejście do zarządzania jakością oraz jego integracja w strukturach organizacyjnych umożliwiają budowanie kultury sprzyjającej zadowoleniu klientów i zwiększeniu wydajności operacyjnej. Ponadto zarządzanie jakością odgrywa znaczącą rolę w zapewnieniu zgodności z wymogami regulacyjnymi oraz kształtowaniu kultury odpowiedzialności i przejrzystości³³. Jest to szczególnie istotne w sektorach takich jak edukacja czy opieka zdrowotna, w przypadku których poziom jakości bezpośrednio wpływa na jakość świadczonych usług i zaufanie interesariuszy³⁴.

W literaturze naukowej podkreśla się również wzajemną zależność między zarządzaniem jakością a zarządzaniem wiedzą. Systematyczne gromadzenie i wykorzystywanie wiedzy stanowi fundament efektywnego zarządzania jakością, wpływając na ciągłe doskonalenie i innowacje w tym obszarze³⁵. Organizacje, które skutecznie zarządzają wiedzą, są lepiej przygotowane do adaptacji w dynamicznym otoczeniu biznesowym oraz do wprowadzania innowacyjnych rozwiązań w zakresie jakości.

Dynamika ewolucji zarządzania jakością jest również związana z rosnącym naciskiem na zrównoważony rozwój³⁶. Coraz więcej organizacji integruje praktyki jakościowe z inicjatywami na rzecz zrównoważonego rozwoju, koncentrując się na

³¹ X. Zu, L.D. Fredendall, T.J. Douglas, *The evolving theory of quality management: The role of Six Sigma*, „Journal of Operations Management” 2008, vol. 26, no. 5, s. 630–650.

³² S. Maksimović, V. Vlašković, A. Damjanović, *Leadership frameworks amidst crisis-induced events*, „SCIENCE International Journal” 2024, vol. 3, no. 2, s. 65–73.

³³ K. Pathmaraj, *The importance of quality management systems in nuclear medicine departments*, „Journal of Medical Radiation Sciences” 2024, vol. 71, no. 2, s. 167–169.

³⁴ N. Lin [i in.], *The Overview of the Teaching Quality Management Center in the Organization of Higher Education*, w: *Proceedings of the 2019 2nd International Conference on Education, Economics and Social Science (ICEESS 2019)*, 2019, s. 121–124.

³⁵ M. Akdere, *The role of knowledge management in quality management practices: achieving performance excellence in organizations*, „Advances in Developing Human Resources” 2009, vol. 11, no. 3, s. 349–361.

³⁶ S. Stępień [i in.], *Are small farms sustainable and technologically smart? Evidence from Poland, Romania, and Lithuania*, „Central European Economic Journal” 2023, vol. 10, no. 57, s. 116–132; S. Kot, *Sustainable supply chain management in small and medium enterprises*, „Sustainability” 2018, vol. 10, no. 4, 1143.

odpowiedzialności biznesowej i tworzeniu długoterminowej wartości dla interesariuszy³⁷.

Należy podkreślić, że rozwój obszaru zarządzania jakością przeszedł długą drogę – od podstawowej kontroli jakości do złożonych systemów integrujących zaawansowane technologie, strategie zarządzania oraz elementy kultury organizacyjnej. Fundamentem współczesnych praktyk są koncepcje opracowane przez takich myślicieli jak Pareto, Juran i Deming. Obecnie organizacje stoją przed wyzwaniem integracji nowoczesnych technologii z tradycyjnymi metodami, co wymaga ciągłego doskonalenia procesów oraz zaangażowania wszystkich pracowników w działania jakościowe. Takie podejście jest kluczowe dla osiągnięcia długoterminowych korzyści i zbudowania trwałej przewagi konkurencyjnej³⁸.

1.2. Zarządzanie jakością w procesach produkcyjnych

Zarządzanie jakością w procesach produkcyjnych jest kluczowym czynnikiem determinującym efektywność działania przedsiębiorstwa oraz jego sukces na rynku. Implementacja i wzajemna integracja filozofii oraz strategii zarządzania jakością, takich jak zarządzanie jakością totalną, Lean Manufacturing (LM) czy Six Sigma, odgrywają istotną rolę w poprawie wydajności produkcji i jakości procesów. Szczególnie ważne jest zdefiniowanie różnych wymiarów zarządzania jakością w sferze produkcji, z uwzględnieniem roli technik statystycznych, ciągłego doskonalenia oraz zaangażowania pracowników.

Zarządzanie jakością totalną stanowi kompleksowe podejście do zarządzania, koncentrujące się na nieustannym doskonaleniu wszystkich obszarów działalności organizacji. Kluczowym elementem TQM jest zaspokajanie potrzeb i oczekiwań klienta na każdym etapie procesu produkcyjnego. Badania Azouza i Masauda wskazują, że TQM jest nieodzowne dla spełniania wymagań klientów oraz podnoszenia jakości produktów poprzez wdrażanie systematycznych metod i technik³⁹. Istotne jest, aby jakość nie była

³⁷ G. Onofrei [i in.], *Quality and lean practices synergies: A swift even flow perspective*, „International Journal of Quality & Reliability Management” 2020, vol. 38, no. 1, s. 98–115; J. Polcyn [i in.], *Factors influencing the renewable energy consumption in selected European countries*, „Energies” 2021, vol. 15, no. 1, 108.

³⁸ J. Dzieńdziora, M. Smolarek, *Innovation 4.0 in developing SME strategy*, w: *Sustainability, Technology and Innovation 4.0*, pod red. nauk. Z. Makiety, M.M. Stuss, R. Borowieckiego, Routledge, London 2021, s. 141–160.

³⁹ O.I. Azouza, K.A.R. Masaud, *Production Process Management on Quality Control in The Iron and Steel Industry in Libya*, „American Journal of Economics and Business Innovation” 2023, vol. 2, no. 3, s. 25–31.

postrzegana jedynie jako kontrola końcowa, lecz była integralnie związana z każdym etapem produkcji.

Lean Manufacturing odgrywa ważną rolę w budowaniu jakości w całej organizacji. Filozofia ta koncentruje się na eliminacji marnotrawstwa, czyli działań, które nie wnoszą wartości dodanej. Xueliang wskazuje, że skuteczna implementacja strategii Lean przyczynia się do znaczącej poprawy wydajności poprzez wspieranie kultury ciągłego doskonalenia i zaangażowania pracowników⁴⁰. Mapowanie strumieni wartości (VSM), będące ważnym narzędziem Lean Manufacturing, ukierunkowane jest na usprawnianie procesów i minimalizowanie działań nieprzynoszących wartości dodanej. Synergia między praktykami Lean i TQM może prowadzić do znaczącej poprawy efektywności procesów produkcyjnych, gdyż obie filozofie podkreślają znaczenie jakości na każdym etapie procesu.

Kolejną koncepcją zarządzania jakością w procesach produkcyjnych jest Six Sigma. Wykorzystuje ona metody statystyczne do monitorowania i nadzorowania produkcji, umożliwiając identyfikację zmienności. Na podstawie uzyskanych danych podejmowane są działania mające na celu jej redukcję. Wprowadzenie ukierunkowanych akcji korygujących pozwala na minimalizowanie niezgodności, co przekłada się na zgodność produktów z wymaganiami jakościowymi. Sutrisno zwraca uwagę, że zastosowanie nawet prostych narzędzi statystycznych ma wpływ na poprawę jakości i efektywności operacyjnej, pozwalając organizacjom skupić się na ciągłym doskonaleniu procesów⁴¹. Ponadto Six Sigma umożliwia budowanie przewagi konkurencyjnej oraz spełnianie oczekiwań klientów poprzez utrzymywanie i doskonalenie standardów jakości.

Kluczowym zagadnieniem jest integracja strategii oraz narzędzi stosowanych w zarządzaniu jakością w procesach produkcyjnych. Zauważono silną zależność pomiędzy *total productive maintenance* (TPM) a TQM, a ich integracja pozwala na uzyskanie synergii. Efektem tego połączenia jest jednoczesna poprawa wydajności produkcji oraz jakości produktów⁴². Wdrażanie praktyk zarządzania jakością powinno

⁴⁰ H. Xueliang, *A study of Lean Production and Quality Management on Production Performance: The Evidence in High-tech Manufacturing Companies in China*, „International Journal of Science and Business” 2023, vol. 22, no. 1, s. 53–70.

⁴¹ T.F. Sutrisno, *Relationship between total quality management element, operational performance and organizational performance in food production SMEs*, „Jurnal Aplikasi Manajemen” 2019, vol. 17, no. 2, s. 285–294.

⁴² K. Singh, I.S. Ahuja, *Effectiveness of tpm implementation with and without integration with tqm in indian manufacturing industries*, „Journal of Quality in Maintenance Engineering” 2014, vol. 20, no. 4, s. 415–435.

być dostosowane do specyficznych potrzeb i wyzwań danej branży. W przypadku produkcji nowoczesnych technologii kluczowe jest połączenie zaawansowanych rozwiązań technologicznych z odpowiednimi metodami zarządzania, co pozwala na utrzymanie wysokiego poziomu konkurencyjności.

Nie można pominąć roli zasobów ludzkich w skutecznym wdrażaniu filozofii, strategii i narzędzi jakościowych. Efektywne zarządzanie pracownikami, obejmujące szkolenia, motywację i zaangażowanie, bezpośrednio wpływa na sukces tych inicjatyw. Trentin i Tontini wskazują, że motywacja i udział pracowników w działaniach jakościowych są kluczowe dla efektywnego wdrożenia Lean Manufacturing⁴³. Zaangażowanie kierownictwa wyższego szczebla jest równie istotne, gdyż ich wsparcie motywuje pracowników i wzmacnia spójność działań ukierunkowanych na ciągłe doskonalenie. Silne przywództwo tworzy środowisko sprzyjające zmianom i podkreśla, że jakość jest fundamentalną wartością organizacji⁴⁴.

Zarządzanie jakością w procesach produkcyjnych stanowi zatem podstawę skutecznego funkcjonowania organizacji, wpływając na każdy etap produkcji oraz poziom satysfakcji klientów. Zintegrowane wdrożenie strategii i narzędzi pozwala osiągnąć efekt synergii, co przekłada się na wyższą efektywność procesów. Kluczowe znaczenie ma zaangażowanie zarówno pracowników na niższych szczeblach, jak i wyższego kierownictwa, które wspiera kulturę ciągłego doskonalenia i jakości. Takie podejście nie tylko optymalizuje procesy produkcyjne, ale również wzmacnia konkurencyjność oraz długotrwały sukces organizacji⁴⁵.

1.3. Koncepcje zarządzania jakością

Na przestrzeni ostatnich lat zarządzanie jakością stało się istotnym elementem praktyki organizacyjnej. Trend ten odzwierciedla rosnące znaczenie jakości w kontekście osiągania przewagi konkurencyjnej oraz satysfakcji klientów w dynamicznie zmieniającym się środowisku biznesowym. Zarządzanie jakością opiera się na systematycznym podejściu, którego celem jest zapewnienie, że wszystkie procesy, usługi oraz produkty nie tylko spełniają, ale często nawet przekraczają oczekiwania klientów.

⁴³ L. Trentin, G. Tontini, *The influence of people management practices on a culture of lean manufacturing*, „Revista De Administração Da UFES” 2022, vol. 15, no. 3, s. 512–540.

⁴⁴ T. Hasan, *Doctors or technicians: assessing quality of medical education*, „Advances in Medical Education and Practice” 2010, vol. 1, s. 25.

⁴⁵ K. Szczepańska-Woszczyńska, J. Kurowska-Pysz, *Sustainable business development through leadership in SMEs*, „Engineering Management in Production and Services” 2016, vol. 8, no. 3, s. 57–69.

Charakteryzuje się zbiorem zasad i praktyk wyznaczających odpowiedni kierunek dla organizacji. Każda z koncepcji oferuje unikatowe ramy teoretyczne oraz narzędzia do poprawy jakości i efektywności. Niezależnie jednak od specyfiki tych podejść, wszystkie dążą do wspólnego celu: tworzenia wartości zarówno dla klientów, jak i interesariuszy.

Współczesne organizacje funkcjonują w coraz bardziej złożonym środowisku, charakteryzującym się wysokim poziomem konkurencyjności oraz szybko zmieniającymi się wymaganiami rynku. Zdolność dostarczania produktów i usług o najwyższej jakości staje się kluczowym wyróżnikiem oraz elementem zapewniającym przetrwanie i rozwój organizacji. Zrozumienie oraz efektywne wdrażanie koncepcji zarządzania jakością jest zatem nieodzownym aspektem nowoczesnego zarządzania.

W niniejszym podrozdziale opisano wybrane koncepcje zarządzania jakością, takie jak zarządzanie jakością totalną, Six Sigma oraz Lean. Przeanalizowane zostały ich teoretyczne podstawy, praktyczne zastosowania oraz wpływ na wyniki organizacji. Szczególna uwaga poświęcona została ich roli w optymalizacji procesów, eliminacji marnotrawstwa, podnoszeniu standardów jakościowych oraz budowaniu długotrwałej przewagi konkurencyjnej.

1.3.1. Zarządzanie jakością totalną

Zarządzanie jakością totalną to kompleksowe podejście ukierunkowane na ciągłe doskonalenie jakości produktów i procesów poprzez zaangażowanie wszystkich członków organizacji. TQM nie jest jedynie zbiorem narzędzi ani technik, lecz filozofią promującą kulturę organizacyjną, skoncentrowaną na jakości. Implementacja TQM prowadzi do poprawy wyników przedsiębiorstwa, zwiększenia zadowolenia klientów oraz uzyskania przewagi konkurencyjnej.

Kluczowym założeniem TQM jest zapewnienie, utrzymanie i nieustanne doskonalenie jakości we wszystkich obszarach działalności, co przekłada się na długotrwały sukces organizacji. Człowiek odgrywa tutaj najważniejszą rolę, wpływając na efektywność i skuteczność realizowanych procesów. Głównym kryterium oceny sprawności funkcjonowania przedsiębiorstwa w kontekście TQM jest jakość oferowanych produktów i świadczonych usług.

TQM jest ściśle powiązane z 14 zasadami zarządzania jakością opracowanymi przez W.E. Deminga, które stanowią fundament skutecznego wdrażania praktyk

jakościowych w różnych branżach – tabela 1.1⁴⁶. Zasady te podkreślają znaczenie przywództwa, ciągłego doskonalenia oraz pełnego zaangażowania pracowników w budowanie kultury organizacyjnej nastawionej na jakość.

Tabela 1.1. Zasady zarządzania jakością Deminga

14 zasad Deminga
1. Utrzymuj stałość celu w doskonaleniu produktów i usług. 2. Przyjmij nową filozofię odrzucającą tolerancję dla wad i opóźnień. 3. Zaprzestań polegania na masowej kontroli. Wprowadź statystyczne metody kontroli jakości. 4. Zaprzestań praktyki wyboru dostawców wyłącznie na podstawie najniższej ceny. Zamiast tego buduj długotrwałe relacje oparte na jakości i zaufaniu. 5. Ciągłe doskonalenie procesów oraz usług. 6. Wprowadź szkolenia na stanowisku pracy. 7. Stosowanie nowoczesnych metod przywództwa (menadżerowie uczą się od pracowników). 8. Wyeliminuj strach. 9. Usuń bariery pomiędzy poszczególnymi strukturami organizacji. 10. Wyeliminuj slogany i zapewnij skuteczne metody. 11. Eliminacja norm ilościowych. 12. Umożliwienie dumy z jakości wykonywanej pracy. 13. Wprowadź intensywny program szkoleniowy. 14. Stwórz strukturę zarządzania umożliwiającą ciągłe doskonalenie wiedzy i efektywności.

Źródło: opracowanie własne na podstawie: W.E. Deming, *Out of the Crisis*, The MIT Press, 2018, s. 17–82

Pierwsza zasada odnosi się do konieczności wyznaczenia stałego celu w zakresie doskonalenia produktów i usług. Podkreśla ona znaczenie długoterminowej wizji organizacji, w której stałość celu skupia się na ciągłym ulepszaniu oferowanych produktów, co zapewnia trwały sukces organizacji. Firmy muszą w pełni angażować się w nieustanne doskonalenie, zwiększając poziom innowacyjności, zamiast jedynie reagować na presję rynku⁴⁷.

Druga zasada akcentuje konieczność przyjęcia nowej filozofii zarządzania, skoncentrowanej na jakości oraz wzajemnej współpracy. Obejmuje ona otwartość na zmiany oraz promowanie kultury organizacyjnej, która przedkłada jakość nad krótkoterminowe zyski. Takie podejście jest kluczowe dla rozwoju organizacji w konkurencyjnym środowisku⁴⁸.

Trzecia zasada zwraca uwagę na potrzebę odejścia od masowej kontroli i opierania analiz na metodach statystycznej kontroli jakości. Sama inspekcja nie jest wystarczająca

⁴⁶ B. Sarkar, *Total quality management – problems and prospects in India*, „Total Quality Management & Business Excellence” 1991, vol. 2, s. 239–248.

⁴⁷ W.E. Deming, *Out of the Crisis*, The MIT Press, 2018, s. 17–82.

⁴⁸ Tamże.

do zapewnienia wysokiej jakości, a organizacje powinny skupić się na wbudowywaniu jakości w procesy. Takie podejście zmniejsza potrzebę kontroli, jednocześnie wzmacniając kulturę jakości w całym przedsiębiorstwie⁴⁹.

Czwarta zasada podkreśla konieczność zakończenia praktyk polegających na zawieraniu kontraktów wyłącznie na podstawie ceny. Organizacje powinny koncentrować się na jakości oraz budowaniu długoterminowych relacji z dostawcami, poszukując partnerów zapewniających materiały wysokiej jakości. Przekłada się to na lepszą jakość produktów końcowych i zadowolenie klientów⁵⁰.

Piąta zasada zaznacza, że ciągle doskonalenie stanowi fundament filozofii. Organizacje powinny regularnie oceniać i optymalizować swoje procesy, co prowadzi do zwiększenia efektywności. Takie podejście powinno być głęboko zakorzenione w kulturze organizacyjnej⁵¹.

Szоста zasada zwraca uwagę na znaczenie szkoleń, które zapewniają pracownikom niezbędną wiedzę i umiejętności do efektywnego wykonywania obowiązków, podkreślając potrzebę ciągłego rozwoju w celu poprawy jakości procesów⁵².

Siódma zasada ukierunkowana jest na rolę przywództwa we wspieraniu kultury jakości. Liderzy powinni koncentrować się na kierowaniu i wspieraniu pracowników, a nie jedynie na zarządzaniu nimi. Takie podejście tworzy środowisko, w którym pracownicy czują się odpowiedzialni i angażują się w inicjatywy jakościowe⁵³.

Ósma zasada wskazuje na konieczność wyeliminowania strachu, który hamuje kreatywność i innowacyjność, aby zbudować środowisko sprzyjające rozwojowi organizacji. Należy tworzyć atmosferę, w której pracownicy czują się komfortowo i mogą bez obaw wyrażać swoje opinie oraz pomysły, wspierając współpracę i ciągle doskonalenie⁵⁴.

Dziewiąta zasada podkreśla potrzebę przełamywania barier wewnątrz organizacji. Wzajemna współpraca między działami jest niezbędna dla budowania przyszłościowego

⁴⁹ R.M. Elhuni, M.M. Ahmad, *Investigating the total quality elements based on Deming management model in oil industry in Libya – an empirical study*, „International Journal of Productivity and Quality Management” 2014, vol. 13, no. 2, s. 142.

⁵⁰ R. Redmond [i in.], *Quality in higher education: The contribution of Edward Deming's principles*, „International Journal of Educational Management” 2008, vol. 22, no. 5, s. 432–441.

⁵¹ W.E. Deming, *Out...*, s. 17–82.

⁵² Tamże.

⁵³ K. Luoma, *Leadership Styles for Deming-Based Management Systems*, „American Journal of Management” 2023, vol. 23, no. 4; W.E. Deming, *Out...*, s. 17–82.

⁵⁴ W.E. Deming, *Out...*, s. 17–82.

przedsiębiorstwa i osiągania celów. Zaznacza wagę eliminowania silosów oraz wspierania pracy zespołowej w celu poprawy kooperacji⁵⁵.

Dziesiąta zasada zakłada eliminację haseł i sloganów przypisanych celom. Według Deminga tego typu komunikaty często tworzą presję, niszcząc pozytywne środowisko pracy. Zamiast nich należy skupić się na optymalizacji procesów, wdrażaniu usprawnień systemowych oraz zapewnieniu pracownikom niezbędnych narzędzi i zasobów do osiągnięcia sukcesu⁵⁶.

Jedenasta zasada wskazuje na potrzebę usunięcia liczbowych limitów dla pracowników. Takie ograniczenia mogą prowadzić do sytuacji, w której skupiają się oni na ilości kosztem jakości, aby spełnić narzucone cele. Organizacje powinny priorytetyzować jakość i zapewnić personelowi warunki do wykonywania pracy na najwyższym poziomie⁵⁷.

Dwunasta zasada zakłada, że pracownicy powinni być dumni z wykonywanej pracy. Istotne jest zapewnienie im odpowiednich narzędzi, szkoleń oraz sprzyjającego środowiska organizacyjnego, z podkreśleniem konieczności usuwania przeszkód, które utrudniają efektywne wykonywanie zadań⁵⁸.

Trzynasta zasada zwraca uwagę na znaczenie ciągłego uczenia się i samodoskonalenia. Organizacje powinny tworzyć kulturę promującą edukację i rozwój osobisty jako drogę do ogólnej poprawy jakości⁵⁹.

Czternasta zasada podkreśla konieczność holistycznego zaangażowania w proces transformacji. Poprawa jakości jest zbiorowym wysiłkiem, wymagającym uczestnictwa wszystkich pracowników, niezależnie od ich pozycji w organizacji. Każdy powinien aktywnie angażować się w proces zmian, przyczyniając się do budowania kultury jakości i ciągłego doskonalenia⁶⁰.

Na podstawie zasad Deminga przedstawionych w tabeli 1.1 można stwierdzić, że skuteczne przywództwo odgrywa kluczową rolę w prawidłowym wdrożeniu systemów zarządzania jakością, a większość tych zasad podkreśla konkretne obowiązki liderów⁶¹. Wskazuje to na fakt, że kierownictwo musi wyjść poza tradycyjne zadania i aktywnie

⁵⁵ Tamże.

⁵⁶ Tamże.

⁵⁷ Tamże.

⁵⁸ Tamże.

⁵⁹ Tamże.

⁶⁰ Tamże.

⁶¹ I. Bäckström, J. Larsson, H. Wiklund, *Are healthy and successful organizations working accordingly to quality management?*, „International Journal of Workplace Health Management” 2009, vol. 2, no. 3, s. 245–257.

angażować się w budowanie kultury ciągłego doskonalenia oraz koncentracji na kliencie. Badania przeprowadzone przez Luomę podkreślają, że tradycyjne style przywództwa są często niezgodne z podejściem Deminga, co wskazuje na konieczność stosowania przywództwa transformacyjnego i rozproszonego⁶².

Należy zaznaczyć, że 14 zasad Deminga zwraca uwagę na znaczenie systemowego podejścia do zarządzania, które zostało szeroko opisane w jego dziełach, takich jak *Out of the Crisis* oraz *The New Economics for Industry, Government, Education*. Cała twórczość jest ukierunkowana na holistyczne spojrzenie na procesy realizowane w organizacji, co jest niezbędne do burzenia barier. W rezultacie możliwa staje się współpraca oraz eliminacja wzajemnej konkurencji między poszczególnymi działami, co finalnie przyczynia się do poprawy jakości. Podejście Deminga znajduje mocne odzwierciedlenie w filozofii TQM, która zakłada, że poprawa jakości jest zbiorową odpowiedzialnością wymagającą zaangażowania na wszystkich poziomach organizacji⁶³. Co więcej, zasady zostały skutecznie zaimplementowane w wielu dziedzinach – nie tylko w produkcji, ale także w opiece zdrowotnej⁶⁴.

14 punktów Deminga zapewnia solidne ramy dla wspierania jakości i ciągłego doskonalenia w różnych sektorach. Ukierunkowanie na myślenie systemowe oraz nacisk na przywództwo i współpracę stanowią istotne elementy dla organizacji dążących do poprawy zarządzania jakością. Ze względu na to, że większość organizacji funkcjonuje w złożonych środowiskach, zasady Deminga mają niebagatelne znaczenie, umożliwiając osiągnięcie trwałej poprawy jakości.

Obok Deminga znaczący wpływ na rozwój TQM miał również J.S. Oakland, który zaproponował model skierowany na integrację zarządzania jakością we wszystkich obszarach organizacji. Model Oaklanda opiera się na koncepcji 4P i 4C, które stanowią integralne elementy w osiągnięciu doskonałości. 4P obejmuje następujące składowe: ludzie (*people*), procesy (*processes*), produkty (*products*) i wydajność (*performance*). 4C obejmuje klienta (*customer*), kulturę (*culture*), komunikację (*communication*) i zaangażowanie (*commitment*)⁶⁵. Oba zbiory elementów podkreślają znaczenie

⁶² K. Luoma, *Leadership Styles...*

⁶³ B. Lahidji, W. Tucker, *Continuous Quality Improvement as a Central Tenet of TQM: History and Current Status*, „Quality Innovation Prosperity” 2016, vol. 20, no. 2, s. 157–168.

⁶⁴ B.M. Wong, L.A. Headrick, *Application of continuous quality improvement to medical education*, „Medical Education” 2020, vol. 55, no. 1, s. 72–81; S. Singh, L.M. Meeks, *Disability inclusion in medical education: Towards a quality improvement approach*, „Medical Education” 2022, vol. 57, no. 1, s. 102–107.

⁶⁵ L. Pimentel, M. Major, *Key success factors for quality management implementation: evidence from the public sector*, „Total Quality Management & Business Excellence” 2015, vol. 27, no. 9–10, s. 997–1012.

dostosowania procesów realizowanych w organizacji do potrzeb klientów oraz wspierania kultury, która stawia jakość jako priorytet na wszystkich poziomach.

Integralnym zagadnieniem modelu TQM zaprezentowanego przez Oaklanda jest przywództwo, które stanowi siłę napędową inicjatyw jakościowych. Jego skuteczność ma zasadnicze znaczenie dla ustanowienia kultury ukierunkowanej na jakość. Liderzy, poza własnym zaangażowaniem w jakość, zobowiązani są aktywnie angażować pracowników, niezależnie od ich funkcji⁶⁶. To podejście potwierdza, że TQM nie jest jedynie zestawem narzędzi czy technik, lecz pełnowymiarową transformacją kulturową, wymagającą zaangażowania wszystkich pracowników⁶⁷.

Ponadto Oakland podkreśla znaczenie ciągłego doskonalenia oraz konieczność przyjęcia przez organizacje systematycznego podejścia w zarządzaniu jakością. Wiąże się to z udoskonalaniem procesów, tak aby wytwarzane produkty spełniały oczekiwania klientów. Wspierając ciągłe doskonalenie, organizacje mogą lepiej wykorzystywać możliwości rozwoju oraz skuteczniej reagować na wyzwania rynku.

W analizie komparatywnej model zarządzania jakością zaprezentowany przez Oaklanda kładzie nacisk na integrację zarządzania jakością ze wszystkimi procesami realizowanymi w organizacji, co stanowi kompleksowe podejście⁶⁸. Z kolei model Deminga również przyjmuje podejście systemowe, ale podkreśla znaczenie wykorzystania metod statystycznych oraz podejmowania decyzji na podstawie danych procesowych⁶⁹.

Oba modele uznają satysfakcję klienta za kluczową wartość w procesach zarządzania jakością. Oakland zaznacza potrzebę zrozumienia i spełniania wymagań klientów przez organizację, podczas gdy Deming zwraca uwagę na budowanie długotrwałych relacji z klientami oraz ciągłe doskonalenie procesów, produktów i usług. Oba podejścia łączą zaangażowanie pracowników w poprawę jakości oraz koncentrację na kliencie. Mimo tych podobieństw model Oaklanda kładzie większy nacisk na tworzenie kultury jakości i integrację procesów, natomiast Deming przedstawia

⁶⁶ C.C. Yang, *The impact of human resource management practices on the implementation of total quality management: An empirical study on high-tech firms*, „The TQM Magazine” 2006, vol. 18, no. 2, s. 162–173.

⁶⁷ L. Pimentel, M. Major, *Key success factors...*, s. 997–1012.

⁶⁸ B. Neyestani, J.B.P. Juanzon, *Developing an Appropriate Performance Measurement Framework for Total Quality Management (TQM) in Construction and Other Industries*, „International Journal of Technology & Engineering” 2016, vol. 5, no. 2, s. 32–44.

⁶⁹ C. Fisher, C.C. Elrod, R. Mehta, *A replication to validate and improve a measurement instrument for Deming's 14 Points*, „International Journal of Quality & Reliability Management” 2011, vol. 28, no. 3, s. 328–358.

ustrukturyzowany zestaw zasad, których główny cel stanowi transformacja w obszarze zarządzania.

Implementacja TQM, pomimo szerokich korzyści, niesie ze sobą pewne wyzwania oraz ograniczenia. Jedną z najbardziej wymagających barier jest aspekt związany z zasobami ludzkimi. Rotacja pracowników prowadzi do utraty wiedzy instytucjonalnej oraz ogólnego spadku jakości i efektywności pracy. Dzieje się tak, ponieważ organizacje zamiast skupić się na szkoleniach i doskonaleniu pracowników, dążą jedynie do utrzymania odpowiedniego poziomu produktywności⁷⁰. Kolejnymi barierami są demotywacja, niewystarczające zaangażowanie oraz niewłaściwe wynagrodzenie, które mogą poważnie wpłynąć na udział pracowników w praktykach TQM⁷¹.

Innym istotnym elementem, który może stanowić przeszkodę w efektywnym wdrożeniu TQM, jest brak odpowiedniego zaangażowania ze strony najwyższego kierownictwa. Może to skutkować brakiem właściwych zasobów skierowanych na inicjatywy wspierające TQM. Badania wykazały, że organizacje z silnym przywództwem, które podkreślają rolę kierownictwa w procesie kreowania i utrzymywania TQM, mają znacznie większe szanse na sukces swoich działań⁷². W przeciwnym razie mogą doświadczać braku motywacji oraz niewłaściwego ukierunkowania działań, co prowadzi do nieefektywności we wdrażaniu modelu TQM. Dodatkowo złożoność zarządzania jakością totalną może stanowić wyzwanie w zakresie właściwego zrozumienia i skutecznego komunikowania założeń, co prowadzi do rozbieżności i nieporozumień w działaniach ukierunkowanych na tworzenie modelu zarządzania jakością oraz kultury ciągłego doskonalenia⁷³.

Ważne zagadnienie stanowi również kultura organizacyjna. Jeśli nie jest ona skoncentrowana na jakości lub ciągłym doskonaleniu, wdrożenie TQM może napotkać opór ze strony pracowników⁷⁴. Ponadto częściowe podejście do zarządzania jakością totalną, zamiast pełnowymiarowego, może wynikać z braku zaangażowania spowodowanego kulturą organizacyjną. Holistyczne zaangażowanie, obejmujące

⁷⁰ A. Alsughayir, *Barriers to TQM implementation within a private medical services organizations in Saudi Arabia*, „International Journal of Business Administration” 2014, vol. 5, no. 3, s. 117.

⁷¹ A.M. Mosadeghrad, *Why TQM does not work in Iranian healthcare organisations*, „International Journal of Health Care Quality Assurance” 2014, vol. 27, no. 4, s. 320–335.

⁷² Z. Huq, *Managing change: a barrier to TQM implementation in service industries*, „Managing Service Quality: An International Journal” 2005, vol. 15, no. 5, s. 452–469.

⁷³ Tamże.

⁷⁴ H. Pussella, S.T.W.S. Yapa, *Barriers in Implementing Total Quality Management in Organizations: A Literature Review*, w: *Proceedings of the 17th International Conference on Business Management*, 2020, vol. 17.

wszystkie aspekty organizacji, jest niezbędne dla właściwego wdrożenia TQM. Dużym zagrożeniem jest także niespójność przyjętych celów strategicznych z założeniami strategii, co może skutkować rozproszeniem wysiłków.

Nieodpowiednie programy szkoleniowe dla pracowników i liderów mogą również stanowić poważny problem. Prowadzi to do braku zrozumienia podejmowanych inicjatyw i utrudnia skuteczne wdrażanie działań na rzecz poprawy jakości⁷⁵.

Wdrażając zarządzanie jakością totalną, należy wziąć pod uwagę wyzwania i ograniczenia wynikające z różnych kwestii, takich jak zasoby ludzkie, zaangażowanie liderów, kultura organizacyjna czy obszar szkoleń. Pokonanie tych barier wymaga kompleksowego podejścia, a dopiero spełnienie podstawowych wytycznych pozwala na pełnowymiarowe wdrożenie filozofii.

1.3.2. Lean jako system doskonalenia

Lean określany jest jako strategia reprezentująca podejście transformacyjne w wielu różnych branżach. Jego nadrzędnym celem jest maksymalizacja wartości przy jednoczesnym minimalizowaniu marnotrawstwa, czyli wszystkich działań, które nie zwiększają wartości dodanej w procesie. Lean wywodzi się z systemu produkcyjnego Toyoty, gdzie został przekształcony w kompleksową filozofię, skupiającą w sobie wiele technik i narzędzi, takich jak 5S, *just-in-time* (JIT) czy *value stream mapping* (VSM)⁷⁶. Jako strategia Lean ukierunkowany jest na usprawnienie procesów, zwiększenie ich wydajności oraz wspieranie kultury ciągłego doskonalenia⁷⁷.

Lean ma zasadnicze znaczenie w zwiększaniu konkurencyjności organizacji oraz reagowaniu na potrzeby rynku, wykraczając tym samym poza obszar redukcji kosztów. Należy zaznaczyć, że skuteczna implementacja filozofii Lean prowadzi do skrócenia czasu realizacji zamówień, poprawy jakości produktów oraz zmniejszenia ilości zapasów powstałych w wyniku nadprodukcji. Ponadto strategia ta jest uznawana za wspierającą zrównoważone praktyki biznesowe poprzez eliminowanie marnotrawstw w całym strumieniu procesu, nie tylko na etapie produkcji⁷⁸.

⁷⁵ Z. Huq, *Managing change...*, s. 452–469.

⁷⁶ S. Singh [i in.], *Key Benefits of Adopting Lean Manufacturing Principles in Indian Construction Industry*, „MATEC Web of Conferences” 2018, vol. 172, 05002.

⁷⁷ A. Karim, K. Arif-Uz-Zaman, *A methodology for effective implementation of lean strategies and its performance evaluation in manufacturing organizations*, „Business Process Management Journal” 2013, vol. 19, no. 1, s. 169–196.

⁷⁸ D.A. Mollenkopf [i in.], *Green, lean, and global supply chains*, „International Journal of Physical Distribution & Logistics Management” 2010, vol. 40, no. 1–2, s. 14–41.

Podkreślić należy dynamiczną ewolucję strategii Lean w kierunku wielopłaszczyznowego podejścia, obejmującego różne dziedziny – nie tylko produkcję, ale także zarządzanie, środowiska biurowe czy sektory usług. Niezależnie od branży celem jest zmniejszenie marnotrawstwa poprzez zwiększenie wartości dodanej.

Lean Manufacturing stanowi istotną odmianę Lean, koncentrując się na optymalizacji procesów produkcyjnych poprzez eliminację obszarów, które nie zwiększają wartości dodanej, co umożliwia zwiększenie wydajności oraz poprawę jakości. Ważnym narzędziem wykorzystywanym w obszarze LM jest VSM, które pozwala zidentyfikować działania nieprzynoszące korzyści w ujęciu holistycznym, co sprawia, że możliwe jest obniżenie kosztów i usprawnienie prowadzonych operacji⁷⁹. Lean Manufacturing kładzie nacisk na ciągłe doskonalenie – kaizen, a także produkcję *just-in-time*. Możliwość wykorzystania wielu technik oraz narzędzi w ramach tej strategii sprawia, że organizacja staje się bardziej elastyczna i dynamiczna⁸⁰.

Kolejnym elementem strategii Lean jest Lean Thinking, który koncentruje się na sposobie myślenia i kulturze organizacyjnej. Zwraca uwagę na promowanie kultury ciągłego doskonalenia, zachęcając wszystkich pracowników do identyfikowania i eliminowania marnotrawstw w codziennych czynnościach, co prowadzi do poprawy efektywności i wydajności⁸¹.

Z kolei Lean Management skupia się na praktykach zarządzania, tworząc środowisko sprzyjające zaangażowaniu pracowników w doskonalenie procesów. Jest mocno zakorzeniony w praktykach przywódczych, które wspierają kulturę ciągłego doskonalenia i wzmacniają pozycję pracowników⁸².

Lean Office stanowi adaptację strategii Lean do obszarów administracyjnych. Podobnie jak w przypadku nadrzędnego celu Lean – Lean Office koncentruje się na eliminacji marnotrawstw, co umożliwia zwiększenie wydajności w środowiskach nieprodukcyjnych⁸³.

⁷⁹ J.K. Liker, J.M. Morgan, *The Toyota Way in Services: The Case of Lean Product Development*, „Academy of Management Perspectives” 2006, vol. 20, no. 2, s. 5–20.

⁸⁰ P. Danese, V. Manfè, P. Romano, *A Systematic Literature Review on Recent Lean Research: State-of-the-art and Future Directions*, „International Journal of Management Reviews” 2017, vol. 20, no. 2, s. 579–605.

⁸¹ J.A. Douglas, J. Antony, A. Douglas, *Waste identification and elimination in HEIs: the role of Lean thinking*, „International Journal of Quality & Reliability Management” 2015, vol. 32, no. 9, s. 970–981.

⁸² M. Lu, P. Fan, *Applying Dematel to Discuss Key Factors in Shaping Organisational Culture of Lean Management*, „South African Journal of Industrial Engineering” 2023, vol. 34, no. 2, s. 22–35.

⁸³ R.D.C. Freitas, M.D.C.D. Freitas, G. Gomes de Menezes, R.S. Odorczyk, *Lean Office contributions for organizational learning*, „Journal of Organizational Change Management” 2018, vol. 31, no. 5, s. 1027–1039.

Zgodnie z filozofią Lean Manufacturing, której nadrzędnym celem jest eliminacja marnotrawstw w celu zwiększenia efektywności operacyjnej, wyróżnia się siedem rodzajów nieefektywności: nadprodukcję, oczekiwanie, zbędny transport, nadmierne przetwarzanie, nadmierne zapasy, zbędne ruchy oraz wady⁸⁴. W tabeli 1.2 przedstawiono typologię marnotrawstw charakterystycznych dla LM.

Nadprodukcja jest uważana za najniebezpieczniejsze z marnotrawstw, ponieważ prowadzi do wytwarzania większej liczby produktów, niż jest to potrzebne, co w sposób kaskadowy generuje kolejne marnotrawstwa. Nie tylko obciąża obszary magazynowe i komplikuje zarządzanie zapasami, ale również wprowadza zbędny ruch oraz nadmierny przepływ dokumentów. Oczekiwanie natomiast prowadzi do nieefektywnego wykorzystania zasobów, gdy pracownicy czekają na informacje lub materiały niezbędne do kontynuowania pracy, co skutkuje spowolnieniem procesów produkcyjnych i zmniejszeniem ogólnej wydajności⁸⁵. Zbędne ruchy pracowników, maszyn i narzędzi prowadzą z kolei do obniżenia produktywności⁸⁶.

Tabela 1.2. Typologia marnotrawstw charakterystycznych dla Lean Manufacturing

Rodzaj marnotrawstwa	Opis
Nadprodukcja	Produkcja w ilościach przekraczających aktualne zapotrzebowanie – produkcja na zapas.
Zapasy	Utrzymywanie nadmiarowych zapasów surowców, półproduktów czy gotowych wyrobów.
Oczekiwanie	Przestoje w procesie produkcyjnym spowodowane oczekiwaniem na odpowiednie zasoby, informacje, pracownika czy dokumenty.
Niepotrzebny transport	Niepotrzebne przemieszczanie materiałów, komponentów lub produktów między lokalizacjami.
Zbędne operacje	Działania, które nie dodają wartości do produktu, takie jak niepotrzebne inspekcje, podwójne przetwarzanie lub redundantne działania biurowe.
Braki	Wady produktów lub defekty, które wymagają poprawek, odpadów lub wywołują reklamacje.
Nadmierne przetwarzanie	Wykonywanie zbędnych lub zbyt skomplikowanych procesów, które nie przynoszą korzyści.

Źródło: opracowanie własne na podstawie: N. Kumar, M. Noordin, M.Z.M. Saman, *Lean Production Weaknesses in Manufacturing Industry: A review*, „Applied Mechanics and Materials” 2015, vol. 735, s. 344–348

⁸⁴ M. Dieste [i in.], *The relationship between lean and environmental performance: Practices and measures*, „Journal of Cleaner Production” 2019, vol. 224, s. 120–131.

⁸⁵ Tamże.

⁸⁶ P. Arunagiri, A. Gnanavelbabu, *Identification of major lean waste and its contributing factors using the fuzzy analytical hierarchy process*, „Transactions of the Canadian Society for Mechanical Engineering” 2016, vol. 40, no. 3, s. 371–382.

Lean zwraca uwagę na aspekt ciągłego doskonalenia, zachęcając organizacje do optymalizacji procesów poprzez identyfikację obszarów problemowych. Wykazano, że strategia Lean minimalizuje zużycie zasobów, takich jak energia, oraz redukuje ilość powstających odpadów, a równoczesne zastosowanie filozofii Lean i działań na rzecz zrównoważonego rozwoju pozwala na osiągnięcie podwójnej korzyści: doskonałości operacyjnej oraz troski o środowisko⁸⁷.

Związek pomiędzy Lean Manufacturing a efektywnością środowiskową jest integralny, gdyż oba są ukierunkowane na właściwe zarządzanie zasobami. Wdrożenie Lean w produkcji nie tylko poprawia wydajność operacyjną, ale także przyczynia się do ograniczenia negatywnego wpływu na środowisko. W obliczu obecnej sytuacji, gdy organizacje stoją przed rosnącymi wymaganiami w zakresie przyjmowania odpowiednich praktyk środowiskowych przy jednoczesnym utrzymaniu konkurencyjności, opisywane podejście odgrywa znaczącą rolę⁸⁸.

Na podstawie powyższych rozważań można stwierdzić, że koncepcja marnotrawstwa w ujęciu Lean Manufacturing ma charakter wieloaspektowy, obejmując działania, które nie przynoszą wartości dodanej. W uproszczeniu definiowana jest jako to, za co klient jest gotów zapłacić, co odnosi się do właściwości produktu spełniających jego oczekiwania. W kontekście organizacji i jej procesów wyróżnia się trzy kategorie działań:

- działania zwiększające wartość dodaną – obejmują procesy bezpośrednio wpływające na tworzenie cech produktu, które są pożądane przez klienta;
- działania niezwiększające wartości dodanej, ale konieczne – są to działania, które choć same nie tworzą wartości, są niezbędne dla zapewnienia spełnienia wymagań klientów, takich jak zgodność z normami czy zapewnienie jakości;
- działania niezwiększające wartości dodanej i zbędne – są to działania, które nie mają wpływu na wartość końcową produktu i powinny być eliminowane z procesów.

Koncentracja na siedmiu wymienionych rodzajach marnotrawstwa pozwala organizacjom optymalizować procesy, zmniejszać koszty i podejmować inicjatywy na rzecz zrównoważonego rozwoju środowiska.

⁸⁷ D. Younnes, *The Impact of Lean Manufacturing Practices on Green Sustainability: The Case of Abdulghani Company*, „European Journal of Business and Management Research” 2023, vol. 8, no. 3, s. 62–67.

⁸⁸ N. Piercy, N. Rich, *The relationship between lean operations and sustainable operations*, „International Journal of Operations & Production Management” 2015, vol. 35, no. 2, s. 282–315.

Pomimo tego, że implementacja strategii Lean obiecuje znaczną poprawę efektywności poprzez eliminację marnotrawstw, filozofia ta jest obarczona pewnymi ograniczeniami i zagrożeniami, które mogą wpływać na skuteczność wdrożenia w różnych sektorach. Wyzwania są szczególnie widoczne w branżach o wysokim poziomie złożoności operacji oraz oporze przed zmianami, takich jak produkcja, opieka zdrowotna czy budownictwo. Jako jedno z głównych ograniczeń należy podkreślić brak odpowiedniego wsparcia ze strony najwyższego kierownictwa, co jest kluczowe dla budowania środowiska i kultury sprzyjającej praktykom Lean. Badania wskazują, że bez silnego zaangażowania kierownictwa filozofia nie może być efektywnie zaimplementowana⁸⁹.

Aspekty kulturowe również odgrywają ważną rolę. W wielu krajach normy kulturowe mogą kolidować z zasadami Lean, powodując opór wśród pracowników⁹⁰. Opór może być dodatkowo potęgowany przez brak świadomości lub właściwego zrozumienia strategii. Kolejnym wyzwaniem są ograniczenia finansowe. Wiele organizacji boryka się z trudnościami w przeznaczeniu odpowiednich zasobów na szkolenia i rozwój, niezbędne do wdrożenia praktyk Lean⁹¹. Ważny element stanowią także kwestie obciążenia finansowego, związane z transformacją, które w dłuższej perspektywie mogą zniechęcać firmy do realizacji założeń filozofii Lean.

Dodatkowo brak odpowiedniej wiedzy technicznej i doświadczenia w zakresie praktyk wdrażanej strategii może skutkować nieefektywnymi wynikami⁹². Niedostatek wiedzy prowadzi do powierzchownego traktowania filozofii, nie przygotowując pracowników do jej skutecznej implementacji i wykorzystania.

Podczas wdrażania strategii Lean istotnym ograniczeniem jest jej złożoność, gdyż nie stanowi ona jedynie zestawu narzędzi, lecz kompleksową filozofię wymagającą od organizacji zmiany kultury i sposobu myślenia⁹³. Może ona prowadzić do niewłaściwej implementacji, a w konsekwencji do nieosiągnięcia zamierzonych celów. Przykład

⁸⁹ A. Abolhassani, K. Layfield, B. Gopalakrishnan, *Lean and US manufacturing industry: popularity of practices and implementation barriers*, „International Journal of Productivity and Performance Management” 2016, vol. 65, no. 7, s. 875–897.

⁹⁰ A. Hamja, P. Hasle, D. Hansen, *Transfer mechanisms for lean implementation with OHS integration in the garment industry*, „International Journal of Productivity and Performance Management” 2021, s. 3534–3555.

⁹¹ A. Abolhassani, K. Layfield, B. Gopalakrishnan, *Lean and US manufacturing industry...*, s. 875–897.

⁹² J.R. Jadhav, S.S. Mantha, S.B. Rane, *Exploring barriers in Lean implementation*, „International Journal of Lean Six Sigma” 2014, vol. 5, no. 2, s. 122–148.

⁹³ A.P. Chaple [i in.], *Modeling the lean barriers for successful lean implementation: TSIM approach*, „International Journal of Lean Six Sigma” 2018, vol. 12, no. 1, s. 98–119.

stanowi sytuacja, w której organizacja skupia się na optymalizacji procesów, zaniedbując pełną transformację kulturową, która stanowi nieodłączny element całej strategii.

Dużym wyzwaniem jest także integracja tej filozofii ze strategiami operacyjnymi, takimi jak technologie Przemysłu 4.0. W wielu przypadkach organizacje mogą napotkać trudności z dostosowaniem zasad Lean i równoczesnym wdrożeniem nowych rozwiązań technologicznych, co może prowadzić do braku zakładanej efektywności⁹⁴. Brak holistycznej strategii integrującej omawianą filozofię z nowymi technologiami może skutkować fragmentarycznymi wysiłkami.

Wśród barier i ograniczeń należy również wymienić czynniki zewnętrzne, na które organizacje nie mają bezpośredniego wpływu. Doskonałym przykładem jest pandemia COVID-19, która w wielu przypadkach uniemożliwiła właściwe budowanie odpowiedniej kultury organizacyjnej. Ponadto zintensyfikowała ona opór wśród pracowników oraz wpłynęła na dostępność zasobów⁹⁵. Konieczność adaptacji w obliczu dynamicznie zmieniającego się środowiska ma znaczący wpływ na wdrażanie i kontynuowanie strategii Lean. Aby poradzić sobie z ograniczeniami występującymi podczas jej wdrażania, konieczne jest kompleksowe zrozumienie kontekstu organizacyjnego, pełne zaangażowanie w zmiany kulturowe oraz odpowiednia alokacja zasobów, tak, aby zapewnić zrównoważone praktyki w zakresie Lean.

1.3.3. Six Sigma – strategia redukcji zmienności w procesach

Six Sigma to strategia oparta na analizie danych, ukierunkowana na doskonalenie procesów poprzez zmniejszenie ich zmienności i eliminację defektów za pomocą narzędzi statystycznych. Powstała w latach 80. XX wieku w firmie Motorola, a jej nadrzędnym celem jest redukcja liczby niezgodności do poziomu poniżej 3,4 defektu na milion, co przekłada się na znaczący wzrost wydajności operacyjnej⁹⁶. W odróżnieniu od filozofii TQM czy Lean Six Sigma kładzie silny nacisk na zaawansowaną analizę danych, umożliwiając identyfikację przyczyn źródłowych problemów i wprowadzenie trwałych

⁹⁴ I. Hoque [i in.], *Implementing and sustaining lean, buyer-supplier role, and COVID-19 pandemic: insights from the garment industry of Bangladesh*, „International Journal of Lean Six Sigma” 2023, vol. 14, no. 5, s. 1010–1034.

⁹⁵ Tamże.

⁹⁶ E. Gijo, J. Scaria, J. Antony, *Application of Six Sigma methodology to reduce defects of a grinding process*, „Quality and Reliability Engineering International” 2011, vol. 27, no. 8, s. 1221–1234.

usprawnień⁹⁷. Strategia ta znalazła zastosowanie w wielu sektorach, takich jak produkcja, finanse czy opieka zdrowotna.

Współczesnym wyzwaniem jest integracja narzędzi i technik Six Sigma z technologiami Przemysłu 4.0, co pozwala na jeszcze większą poprawę wydajności procesów oraz lepsze dostosowanie do dynamicznych wymagań rynku⁹⁸. Kluczowe dla skutecznej implementacji Six Sigma są silne zaangażowanie kierownictwa, kultura organizacyjna wspierająca ciągłe doskonalenie oraz odpowiednie szkolenia.

Poprzez zastosowanie specjalistycznych narzędzi i technik Six Sigma oferuje kompleksowe rozwiązania w zakresie zarządzania jakością. Do kluczowych narzędzi należą m.in. diagram Ishikawy, analiza Pareto, analiza rodzajów i skutków możliwych błędów (FMEA), statystyczna kontrola procesu oraz analiza wariancji (ANOVA). Choć każde z tych narzędzi pełni specyficzną funkcję, ich wspólnym celem jest redukcja zmienności procesów i zwiększenie ich wydajności.

Diagram Ishikawy, znany również jako diagram przyczynowo-skutkowy, odgrywa istotną rolę w fazie analizy w podejściu DMAIC. Służy do systematycznej identyfikacji potencjalnych przyczyn problemów poprzez ich grupowanie w kategorie takie jak ludzie, maszyny, metody, materiały, pomiary i środowisko⁹⁹. Narzędzie to jest również wykorzystywane w filozofii Lean do identyfikacji marnotrawstw, co podkreśla jego wszechstronność. Diagram Ishikawy wspiera współpracę zespołową oraz ułatwia wizualizację i mapowanie potencjalnych źródeł problemów.

Analiza Pareto opiera się na zasadzie Pareto, która wskazuje, że 20% przyczyn odpowiada za 80% skutków. W kontekście Six Sigma pomaga ona w kolejkowaniu działań poprzez identyfikację najważniejszych czynników generujących problemy. Skupienie się na kluczowych przyczynach umożliwia efektywną alokację zasobów i znaczącą poprawę jakości oraz wydajności procesów¹⁰⁰.

Analiza rodzajów i skutków możliwych błędów to narzędzie prewencyjne, którego celem jest identyfikacja i eliminacja potencjalnych wad na etapie projektowania lub wytwarzania. Poprzez systematyczne wykrywanie oraz analizę możliwych błędów i ich

⁹⁷ J. Antony, *Some pros and cons of Six Sigma: an academic perspective*, „The TQM Magazine” 2004, vol. 16, no. 4, s. 303–306.

⁹⁸ M.A. Qutait, *The Role of Six Sigma Approach by Applying (DMAIC) Model and Forming Work Team in Improving Banks Performance: A Survey Study in Syrian Banks in Damascus*, „Journal of Social Sciences” 2018, vol. 14, no. 1, s. 169–180.

⁹⁹ S.K. Dewi, *Minimasi defect produk dengan konsep Six Sigma*, „Jurnal Teknik Industri” 2012, vol. 13, no. 1, s. 43.

¹⁰⁰ R. Bañuelas, J. Antony, M. Brace, *An application of Six Sigma to reduce waste*, „Quality and Reliability Engineering International” 2005, vol. 21, no. 6, s. 553–570.

skutków FMEA umożliwia ustalenie priorytetów działań oraz wdrożenie środków zapobiegawczych przed wystąpieniem problemów¹⁰¹.

Statystyczna kontrola procesu stanowi integralny element metodyki Six Sigma, pozwalając na monitorowanie i kontrolę procesów za pomocą metod statystycznych. Kluczowym narzędziem SPC są karty kontrolne, które umożliwiają wizualizację wydajności procesu i identyfikację trendów wskazujących na potencjalne nieprawidłowości¹⁰². W efekcie zespoły mogą podejmować świadome decyzje oparte na danych, co przyczynia się do stabilizacji i optymalizacji procesów.

ANOVA to narzędzie statystyczne wykorzystywane w Six Sigma do oceny wpływu różnych czynników na wyniki procesu. Służy do porównywania średnich wartości w wielu grupach danych, umożliwiając określenie, czy występujące między nimi różnice są statystycznie istotne. Pozwala to na zrozumienie relacji między zmiennymi i identyfikację czynników mających wpływ na proces.

Opisane narzędzia i techniki stanowią fundamentalne elementy strategii Six Sigma, wspierając organizacje w dążeniu do doskonałości operacyjnej.

Six Sigma może być realizowana w ujęciu metodyki DMAIC, która stanowi centralne podejście strategii. DMAIC – akronim od angielskich słów *define, measure, analyze, improve, control*, to strukturyzowany proces oparty na analizie danych, ukierunkowany na poprawę efektywności poprzez redukcję zmienności i liczby defektów. Metodyka ta znajduje zastosowanie w różnych sektorach gospodarki, nie ograniczając się jedynie do branży produkcyjnej, co świadczy o jej uniwersalności i elastyczności.

Pierwsza faza, definiowania (*define*), polega na precyzyjnym określeniu celu projektu na podstawie zidentyfikowanego problemu. Jest to kluczowy etap wyznaczający kierunek dalszych działań i zapewniający spójność wśród członków zespołu projektowego. Dokładne zdefiniowanie problemu umożliwia skupienie się na ważnych aspektach wpływających na wydajność procesu¹⁰³. W zależności od specyfiki branży faza

¹⁰¹ M. Uluskan, E.P. Oda, *A thorough Six Sigma DMAIC application for household appliance manufacturing systems: Oven door-panel alignment case*, „The TQM Journal” 2020, vol. 32, no. 6, s. 1683–1714.

¹⁰² L. Gaikwad, V.K. Sunnapwar, *An integrated Lean, Green and Six Sigma strategies: A systematic literature review and directions for future research*, „The TQM Journal” 2020, vol. 32, no. 2, s. 201–225.

¹⁰³ D.L. Hardy, S. Kundu, M. Latif, *Productivity and process performance in a manual trimming cell exploiting Lean Six Sigma (LSS) DMAIC – a case study in laminated panel production*, „International Journal of Quality & Reliability Management” 2021, vol. 38, no. 9, s. 1861–1879.

ta może również uwzględniać głos klienta (*voice of the customer*, VOC) w celu lepszego zrozumienia jego oczekiwań, pozwalając na dostosowanie działań do potrzeb rynku.

Druga faza, pomiaru (*measure*), obejmuje ilościowe określenie aktualnego stanu procesu oraz jego efektywności. Zbieranie rzetelnych danych jest niezbędne do identyfikacji obszarów generujących problemy, stanowiąc fundament dla analizy przyczyn źródłowych.

Trzecia faza, analizy (*analyze*), polega na zinterpretowaniu zebranych danych w celu określenia głównych przyczyn nieefektywności oraz wad. Wykorzystanie narzędzi statystycznych pozwala ukierunkować dalsze działania.

Faza czwarta, ulepszanie (*improve*), obejmuje wypracowanie i wdrożenie rozwiązań mających na celu poprawę obszarów zidentyfikowanych w fazie analizy. Składa się z testowania i eksperymentowania z proponowanymi usprawnieniami. Iteracyjny charakter tej fazy ułatwia ciągłe doskonalenie wdrożeń.

Ostatnia, piąta faza, kontrola (*control*), zapewnia, że zaimplementowane usprawnienia są trwałe. Integralne elementy stanowią systemy monitorowania oraz plany kontroli mające na celu utrzymanie wypracowanych rozwiązań.

Podejście DMAIC nadaje solidne ramy dla organizacji dążących do optymalizacji procesów z wykorzystaniem filozofii Six Sigma. Systematyczne definiowanie problemów na podstawie danych procesowych oraz zwinne wdrażanie ulepszeń sprawiają, że organizacje są zdolne do znaczącej poprawy wydajności operacyjnej.

Oprócz podejścia DMAIC kluczowe znaczenie dla strategii Six Sigma ma także metodyka DMADV – *define, measure, analyze, design, verify*. W odróżnieniu od DMAIC, który ukierunkowany jest na optymalizację i ulepszanie istniejących procesów, DMADV wykorzystywany jest w sytuacjach, w których celem są opracowanie nowego procesu, tak, aby spełniał wymagania klienta, oraz zdefiniowane standardy jakości¹⁰⁴.

Podobnie jak DMAIC – DMADV składa się z pięciu faz. Pierwsza z nich, definiowanie (*define*), obejmuje identyfikację celów oraz wymagań klienta w ramach realizowanego projektu. Faza stanowi fundament dla kolejnych działań, co pozwala zespołowi projektowemu na jasne wytyczenie celu, do którego dąży¹⁰⁵.

¹⁰⁴ A. Sujová, L. Šimanová, K. Marcinek, *Sustainable Process Performance by Application of Six Sigma Concepts: The Research Study of Two Industrial Cases*, „Sustainability” 2016, vol. 8, no. 3, 260.

¹⁰⁵ S. Hunold, *How to apply Six Sigma to revenue management*, „Journal of Revenue and Pricing Management” 2013, vol. 13, no. 1, s. 23–34.

Kolejna faza, pomiaru (*measure*), ukierunkowana jest na ilościowe określenie potrzeb klienta. Pozwala ustalić wskaźniki wydajności, które stanowią podstawę do oceny efektywności projektu.

Faza analizy (*analyze*) koncentruje się na ocenie zebranych danych, umożliwiając identyfikację potencjalnych alternatyw. Wykorzystuje się w niej narzędzia statystyczne oraz techniki modelowania, które pozwalają ocenić wykonalność i skuteczność proponowanych rozwiązań¹⁰⁶.

Faza projektowania (*design*) ukierunkowana jest na tworzenie rozwiązania zgodnie z przyjętymi założeniami. Ostatnia faza, weryfikacji (*verify*), obejmuje testowanie w celu upewnienia się, że zaprojektowane rozwiązania spełniają określone wytyczne. Etap łączy testy w obszarach pilotażowych, badania walidacyjne oraz działania korekcyjne na podstawie informacji zwrotnych przed finalnym wdrożeniem¹⁰⁷.

DMADV znajduje zastosowanie w projektowaniu nowych modeli procesowych lub usługowych. Podejście to nie tylko zwraca uwagę na jakość, ale także integruje informacje zwrotne od klientów, co zapewnia zgodność wytworzonych produktów z ich oczekiwaniami. Ponadto DMADV stanowi ustrukturyzowane podejście dla organizacji nastawionych na implementację innowacji i opracowywanie nowych produktów.

Cykl 8D to ustrukturyzowane podejście do rozwiązywania problemów, które – podobnie jak DMAIC czy DMADV – jest szeroko stosowane w wielu branżach. Skupia się na identyfikacji, poprawie oraz eliminacji powtarzających się problemów, usprawniając tym samym realizowane procesy. 8D składa się z ośmiu etapów: D1 – powołanie zespołu, D2 – zdefiniowanie problemu, D3 – opracowanie tymczasowych zadań zapobiegawczych, D4 – określenie i weryfikacja przyczyn źródłowych, D5 – wybór i weryfikacja trwałych działań korygujących, D6 – wdrożenie i walidacja działań korygujących, D7 – zapobieganie nawrotom problemu, D8 – podsumowanie pracy zespołu. Każdy z wymienionych kroków jest integralną częścią metodyki i ma kluczowe znaczenie dla zapewnienia trwałego rozwiązania oraz zapobiegania podobnym problemom w przyszłości¹⁰⁸. Poprzez swój charakter cykl 8D umożliwia zespołowi systematyczne podejście do problemów, gwarantując, że wszystkie aspekty zostały

¹⁰⁶ A. Trubetskaya, O. McDermott, A. Ryan, *Application of Design for Lean Six Sigma to strategic space management*, „The TQM Journal” 2023, vol. 35, no. 9, s. 42–58.

¹⁰⁷ C. Huang [i in.], *Enhancement of Axle Bearing Quality in Sewing Machines Using Six Sigma*, „Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture” 2010, vol. 224, no. 10, s. 1581–1590.

¹⁰⁸ M.J. Sharma, S. Sharma, S.P. Sahni, *Structured problem solving: combined approach using 8D and Six Sigma case study*, „Engineering Management in Production and Services” 2020, vol. 12, no. 1, s. 57–69.

uwzględnione, a rozwiązania dokładnie zweryfikowane przed etapem finalnego wdrożenia. Metodyka ta kładzie również nacisk na wzajemną współpracę, co jest niezbędne przy rozwiązywaniu złożonych zagadnień obejmujących różne działy i obszary specjalizacji.

8D wykazuje zarówno podobieństwa, jak i różnice w porównaniu z innymi podejściami w ujęciu rozwiązywania problemów (DMAIC czy choćby DMADV). Wszystkie wymienione metodyki dążą do poprawy procesów i eliminacji defektów, jednak różnią się strukturą i zastosowaniem. DMAIC jest podstawowym narzędziem w ramach Six Sigma, skupiającym się na usprawnianiu procesów poprzez analizę statystyczną i decyzje oparte na danych¹⁰⁹. Kluczowym podobieństwem między cyklem 8D a DMAIC jest nacisk na analizę przyczyn źródłowych. W obu przypadkach priorytetem jest zrozumienie fundamentalnych przyczyn problemów, aby zapobiec ich ponownemu wystąpieniu. Cykl 8D osiąga to poprzez etapy określania i weryfikacji przyczyn, podczas gdy DMAIC wykorzystuje różnorodne narzędzia i techniki statystyczne do analizy danych i identyfikacji nieefektywności procesów. Ponadto obie metodyki koncentrują się na wdrażaniu działań naprawczych i ustanawianiu kontroli w celu zapewnienia trwałości wprowadzonych zmian.

Mimo różnic cykl 8D zawiera elementy charakterystyczne dla cyklu PDCA, który odgrywa istotną rolę w procesach ciągłego doskonalenia. PDCA podkreśla iteracyjne ulepszanie i jest często stosowany w połączeniu zarówno z metodyką 8D, jak i DMAIC. W kontekście cyklu 8D początkowe kroki można postrzegać jako planowanie i działanie, podczas gdy końcowe etapy odpowiadają sprawdzaniu i wprowadzaniu korekt, co zapewnia skuteczność rozwiązań i ciągłe doskonalenie procesów. Co więcej, cykl 8D jest szczególnie korzystny w środowiskach charakteryzujących się dużą dynamiką zmian i złożonością¹¹⁰.

Skuteczność metodyki 8D potwierdzają liczne studia przypadków, które wskazują na jej zdolność do zmniejszania liczby defektów i poprawy ogólnej jakości. Przykładowo organizacje, które wdrożyły cykl 8D, odnotowały znaczący spadek liczby błędów oraz wzrost zadowolenia klientów¹¹¹.

¹⁰⁹ J.A. Marín-García [i in.], *Protocol: Triple Diamond method for problem solving and design thinking. Rubric validation*, „Working Papers on Operations Management” 2020, vol. 11, no. 2, s. 49–68.

¹¹⁰ K. Teplická [i in.], *Improving the Quality of Automotive Components through the Effective Management of Complaints in Industry 4.0*, „Applied Sciences” 2023, vol. 13, no. 14, 8402.

¹¹¹ M. Barsalou, M. Grabowska, R. Perkin, *Inquiry into the Effectiveness of Eight Discipline-Based Problem-Solving*, „Quality Innovation Prosperity” 2023, vol. 27, no. 2, s. 61–76.

Podobnie jak filozofie oraz metodyki scharakteryzowane w obrębie niniejszego rozdziału integracja strategii Six Sigma i Lean w ramach Lean Six Sigma (LSS) przynosi wymierne korzyści w kontekście zarządzania jakością i wydajnością procesów. Równoległe zastosowanie tych podejść tworzy hybrydę, która intensyfikuje działania na rzecz poprawy wydajności organizacji, koncentrując się zarówno na eliminowaniu marnotrawstw, jak i zmniejszaniu niezgodności procesowych poprzez analizę danych. Początkowo obie strategie były wdrażane niezależnie, ale pod koniec lat 90. nastąpił znaczny wzrost ich równoległego wykorzystania¹¹². Ramy strategii Lean Six Sigma integrują zasady i narzędzia obu metod, zwiększając całościową wydajność systemu.

Jednym z ograniczeń w implementacji Lean Six Sigma są różnice kulturowe między obiema filozofiami, które mogą stanowić wyzwanie podczas wdrażania LSS. Należy zauważyć, że Lean charakteryzuje się większą elastycznością, podczas gdy Six Sigma koncentruje się na analizie danych procesowych¹¹³.

1.4. Definicje jakości

Filozoficzne podejście do jakości podkreśla relację między jakością a ilością, wskazując, że jakość wynika z atrybutów lub cech definiujących istotę obiektu, podczas gdy ilość odnosi się do mierzalnych aspektów nadających strukturę tym cechom. Ta zależność jest szczególnie istotna w kontekście zarządzania jakością w procesach produkcyjnych.

Różne doktryny filozoficzne sugerują, że jakość nie jest wyłącznie nieodłączną cechą, lecz jest definiowana i oceniana za pomocą ilościowych wskaźników. W obszarze produkcji koncepcja jakości ma kluczowe znaczenie – nie może być traktowana jako abstrakcja – musi być mierzalna, aby spełniała określone standardy.

Analizując definicje jakości, warto skupić się na ciągłym doskonaleniu we wszystkich obszarach, co ma na celu poprawę produktów, procesów, usług oraz relacji z interesariuszami¹¹⁴. W ten sposób perspektywa harmonizuje z szerokim filozoficznym dyskursem na temat jakości, który nie ogranicza się do spełniania ustalonych standardów,

¹¹² M.A. Shamsi, A. Alam, *Exploring Lean Six Sigma implementation barriers in Information Technology industry*, „International Journal of Lean Six Sigma” 2018, vol. 9, no. 4, s. 523–542.

¹¹³ T.M. Shahada, I. Alsyoud, *Design and implementation of a Lean Six Sigma framework for process improvement: A case study*, w: *International Conference on Industrial Engineering and Engineering Management*, 2012, s. 80–84.

¹¹⁴ P.J. Woodroof, K. Howie, M.C. Peasley, *Nonprofit quality: What is it and why should nonprofits care?*, „Journal of Philanthropy and Marketing” 2020, vol. 26, no. 1.

ale również wspiera środowisko sprzyjające rozwojowi. Jakość można postrzegać jako dynamiczny proces, wymagający zaangażowania organizacji w dążenie do doskonałości, co sugeruje, że organizacja powinna przyjąć orientację na jakość jako fundamentalny element swojej filozofii. W rezultacie możliwe jest zwiększenie efektywności w różnych obszarach jej funkcjonowania.

Jakość stanowi integralny element funkcjonowania przedsiębiorstw, prowadzonych procesów oraz wytwarzanych produktów. Najprostsza definicja jakości wskazuje, że jest to zbiór cech i właściwości produktów, usług oraz procesów, które spełniają określone wytyczne i zaspokajają potencjalne potrzeby¹¹⁵. Jakość jest również uznawana za miarę efektywności działania przedsiębiorstwa. Kluczowe zagadnienie stanowi porównanie jakości i produktywności oraz ich wzajemne powiązania w ujęciu optymalizacji procesów. Aby osiągnąć wysoki poziom produktywności, niekiedy konieczne staje się obniżenie jakości prowadzonych procesów lub wytwarzanych produktów. Z kolei zwiększenie jakości może prowadzić do zmniejszenia produktywności. Te zależności wskazują na potrzebę optymalizacji procesów, która zapewni równowagę między jakością a produktywnością¹¹⁶.

Współcześnie jakość jest uznawana za jeden z kluczowych czynników budowania przewagi konkurencyjnej organizacji na rynku globalnym. Na przestrzeni ostatnich lat jej postrzeganie i rola uległy znaczącej transformacji. Od prostych metod inspekcji i kontroli jakości, przez rozwój systemów zapewnienia jakości, aż po nowoczesne koncepcje zarządzania jakością obserwujemy nieustanny proces ewolucji podejścia do tego zagadnienia¹¹⁷. Koncentracja na konsekwentnym spełnianiu standardów dla określonych produktów lub usług definiuje jakość w kontekście niezawodności i jednolitości. W obszarze produkcji i świadczenia usług systematyczne wykorzystanie danych i metod statystycznych stanowi kluczowy element utrzymania oraz doskonalenia jakości. Zastosowanie narzędzi statystycznych, takich jak wykresy rozrzutu czy linii regresji, może znacząco poprawić zarządzanie jakością w czasie rzeczywistym, co bezpośrednio przekłada się na wzrost efektywności operacyjnej. Metody statystyczne odgrywają także istotną rolę w kontroli jakości, umożliwiając rozwiązywanie problemów i podejmowanie

¹¹⁵ X. Anguo, *The Conception of Quality in Marketing*, „Journal of Gansu Radio & Tv University” 2004, vol. 14, no. 4, s. 23–26; F. Meng, J. Yang, *Process capability analysis of Taguchi index Cpm based on generalized p-value*, „Quality and Reliability Engineering International” 2023, vol. 39, no. 6, s. 2311–2329.

¹¹⁶ G. Singh, A. Verma, *A Brief Review on injection moulding manufacturing process*, „Materials Today” 2017, vol. 4, s. 1423–1433.

¹¹⁷ A. Zonnenshain, R.S. Kenett, *Quality 4.0 – the challenging future of quality engineering*, „Quality Engineering” 2020, vol. 32, no. 4, s. 614–626.

decyzji dotyczących ilości wadliwych elementów wytwarzanych w procesie produkcyjnym¹¹⁸.

Jakość jest pojęciem wielowymiarowym, definiowanym różnie, w zależności od dziedziny. W kontekście edukacji odnosi się do skuteczności i efektywności procesu kształcenia, stanowiąc kluczowy czynnik budujący przewagę konkurencyjną instytucji edukacyjnych. Wdrożenie odpowiednich systemów zapewniania jakości umożliwia podniesienie standardów oraz wspiera proces ciągłego doskonalenia. Badania przeprowadzone przez Sampul i in. wykazały, że systemy zapewniania jakości są niezbędne dla poprawy wyników kształcenia i przyczyniają się do trwałego rozwoju instytucji¹¹⁹. Koncepcja jakości w edukacji składa się z trzech kluczowych elementów: kontroli jakości, zapewnienia jakości i zarządzania jakością, które tworzą hierarchię odzwierciedlającą złożoność pojęcia¹²⁰.

Analizując pojęcie jakości, należy również zauważyć jej związek z właściwą alokacją zasobów. Badania wskazują, że efektywne wykorzystanie funduszy edukacyjnych koreluje z poprawą standardów jakościowych w obszarze edukacji. Zjawisko to podkreśla, że jakość nie może być interpretowana jedynie jako funkcja praktyk instytucjonalnych – konieczne jest również uwzględnienie odpowiedniej alokacji zasobów oraz skutecznego zarządzania nimi¹²¹.

Znaczenie jakości wykracza poza edukację i obejmuje także opiekę zdrowotną, w obrębie której ma istotny wpływ na poziom świadczonych usług. Kaplan i Ries podkreślają zróżnicowane podejścia do definiowania jakości życia, wyróżniając trzy główne wymiary: psychologiczny, fizyczny oraz społeczny, co dodatkowo komplikuje jej ocenę¹²². Należy zauważyć, że jakość nie jest miarą jednowymiarową, lecz stanowi złożenie różnych atrybutów.

W sektorze usług jakość definiowana jest przez stopień spełniania potrzeb klientów, podkreślając znaczenie zaangażowania interesariuszy w procesy zapewniania jakości. Ta

¹¹⁸ F. Blanco-Encomienda, E. Rosillo-Díaz, J. Muñoz-Rosas, *Importance of Quality Control Implementation in the Production Process of a Company*, „European Journal of Economics and Business Studies” 2018, vol. 4, s. 240–244.

¹¹⁹ D. Sampul [i in.], *Implementation of the Internal Quality Assurance Process: Quality Mapping Analysis at State Senior High School in Tomohon City, North Sulawesi, Indonesia*, „International Journal of Recent Educational Research” 2020, vol. 1, no. 2, s. 124–133.

¹²⁰ T.B. Susilowati, V.R. Handoko, B. Kusbandrijo, *Evaluation of quality assurance of primary school education in ponorogo regency*, „Jurnal Administrasi Publik” 2023, vol. 21, no. 1, s. 230–246.

¹²¹ X. Wang, L. Zhu, S. Yang, *The relationship between the use benefit of educational funds and education quality*, „Frontiers in Educational Research” 2023, vol. 6, no. 31, s. 1–5.

¹²² R.M. Kaplan, A.L. Ries, *Quality of Life: Concept and Definition*, „Journal of Chronic Obstructive Pulmonary Disease” 2007, vol. 4, no. 3, s. 263–271.

perspektywa zwraca uwagę na konieczność odejścia od wyłącznie wewnętrznych wskaźników realizacji celów organizacji i skupienia się na zewnętrznym postrzeganiu firmy oraz jej produktów w kontekście satysfakcji klientów¹²³.

Definicje jakości, w zależności od branży, są szeroko zróżnicowane, podkreślając specyfikę poszczególnych sektorów. Obejmują one różnorodne perspektywy, koncentrujące się zarówno na ciągłym doskonaleniu procesów, jak i zaangażowaniu interesariuszy. Ważnym elementem jest także dostosowywanie praktyk organizacyjnych do podstawowych wartości firmy, co sprawia, że jakość staje się integralną częścią funkcjonowania każdej organizacji. Nie powinna być interpretowana jedynie jako miara techniczna, lecz jako kompleksowa filozofia kształtująca kulturę organizacyjną, wpływając na jej unikatowy charakter i wyróżniając ją na tle innych jednostek.

1.5. Znaczenie jakości w różnych obszarach funkcjonowania przedsiębiorstwa

Jakość stanowi kluczowy element funkcjonowania każdej organizacji, wpływając na wydajność operacyjną, satysfakcję klientów oraz ogólne wyniki biznesowe. Systemy zarządzania jakością (QMS) odgrywają ważną rolę w zapewnieniu, że produkty i usługi spełniają lub przewyższają oczekiwania klientów, co sprzyja budowaniu silnej marki oraz wzajemnego zaufania. Sprawnie działający QMS przyczynia się do minimalizacji wad i zwiększenia zadowolenia klientów, wpływając na lojalność oraz długoterminowy rozwój przedsiębiorstwa¹²⁴.

Badania wykazują, że efektywne zarządzanie jakością znacząco poprawia wyniki w zakresie jakości i bezpieczeństwa, podkreślając znaczenie podejścia zorientowanego na klienta¹²⁵. Istotnym zagadnieniem jest integracja praktyk zarządzania jakością z zarządzaniem łańcuchem dostaw w celu optymalizacji wydajności operacyjnej. Muthukrishnan zaznacza, że wdrożenie systemu zarządzania jakością pozytywnie wpływa na wyniki organizacji, szczególnie w kontekście zadowolenia klientów oraz

¹²³ F. Ismail, A.M.D. Pawero, M.I.A. Umar, *Improving Educational Quality through Optimizing the Potential of Educational Institutions in Indonesia*, „International Journal of Educational Research” 2021, vol. 2, no. 1, s. 41–46.

¹²⁴ N. Pratiwi [i in.], *Quality Performance of Manufacturing Companies in West Java: SCM, TQM, and JIT Impact*, „Jurnal Informatika Ekonomi Bisnis” 2023, s. 785–790.

¹²⁵ J. Hong [i in.], *Supply chain quality management and firm performance in China's food industry – the moderating role of social co-regulation*, „International Journal of Logistics Management” 2020, vol. 31, no. 1, s. 99–122.

redukcji kosztów jakości¹²⁶. Podobne wnioski przedstawili Saragih i in., podkreślając konieczność holistycznego podejścia do jakości, obejmującego wszystkie obszary operacyjne organizacji, co znacząco wpływa na ogólne rezultaty firmy¹²⁷.

W badaniach przeprowadzonych przez Donga i Zhanga wykazano, że solidne środowisko biznesowe, charakteryzujące się efektywnymi praktykami zarządzania jakością, znacząco wpływa na rozwój organizacji oraz osiągnięcie zrównoważonego rozwoju¹²⁸. Jakość otoczenia biznesowego jest szczególnie ważna dla małych i średnich przedsiębiorstw, gdzie czynniki polityczne, takie jak wsparcie państwa dla przedsiębiorczości oraz regulacje prawne, wpływają na jej globalne postrzeganie¹²⁹.

Rzeczywistość jakości biznesowej jest również silnie powiązana z identyfikacją wymagań klientów, bezpośrednio wpływając na konkurencyjność i innowacyjność przedsiębiorstw. Różnice sektorowe prowadzą do odmiennego postrzegania czynników determinujących jakość, co ma istotne znaczenie dla kształtowania strategii operacyjnych w małych i średnich przedsiębiorstwach¹³⁰.

Wielowymiarowość jakości sprawia, że odgrywa ona kluczową rolę w świadczeniu usług, budując zaufanie oraz zaangażowanie w relacjach biznesowych. W efekcie możliwa jest poprawa długoterminowych wyników organizacji. Jakość, obok zaufania i zaangażowania, staje się fundamentalnym elementem w kształtowaniu stabilnych i trwałych relacji, stanowiąc podstawę sukcesu rynkowego i konkurencyjności przedsiębiorstwa.

Oprócz jakości usług i jakości operacyjnej coraz większe znaczenie przypisuje się jakości zarządzania danymi, która stanowi wartość w doskonaleniu procesów biznesowych. Panahy i in. wskazują, że wysoka jakość danych jest kluczowym czynnikiem w zwiększaniu efektywności procesów biznesowych, podczas gdy niska

¹²⁶ R. Muthukrishnan, *A Study On Impact Of Quality Management System On Organizational Performance At Oil Seal Manufacturing Industries In Madurai*, „Turkish Journal of Computer and Mathematics Education” 2021, vol. 12, no. 10, s. 6011–6018.

¹²⁷ J. Saragih [i in.], *The impact of Total Quality Management, supply chain management practices and operations capability on firm performance*, „Polish Journal of Management Studies” 2020, vol. 21, no. 2, s. 384–397.

¹²⁸ Z. Dong, Z. Zhang, *Does the Business Environment Improve the Sustainable Development of Enterprises?*, „Sustainability” 2022, vol. 14, no. 20, 13499.

¹²⁹ J.D.J. Belás [i in.], *Improvement of the quality of business environment model: Case of the SME segment*, „Engineering Economics” 2019, vol. 30, no. 5, s. 601–611.

¹³⁰ J. Dvorský [i in.], *Quality of Business Environment of the SME: A Sectoral View*, „Communications – Scientific Letters of the University of Zilina” 2020, vol. 22, no. 4, s. 163–172.

jakość danych może prowadzić do błędnych analiz i wniosków, utrudniając wysiłki podejmowane w celu ich usprawnienia¹³¹.

Jakość wpływa na różne obszary funkcjonowania organizacji, oddziałując zarówno na procesy wewnętrzne, jak i na poziom satysfakcji klientów. W kontekście produkcji implementacja narzędzi kontroli jakości, takich jak statystyczna kontrola procesu, umożliwia efektywne monitorowanie i ciągłe doskonalenie procesów, co przekłada się na poprawę wydajności i jakości produktów¹³². W pracach programistycznych wymagania jakościowe odgrywają istotną rolę w określaniu sukcesu systemu, a ich znaczenie może się różnić w zależności od celów projektu oraz ról pełnionych przez członków zespołu. Właściwe określenie i realizacja tych wymagań są niezbędne do zapewnienia, że finalny produkt spełni oczekiwania użytkowników i zrealizuje założone cele¹³³. Jakość, rozpatrywaną z perspektywy finansowej, należy traktować nie jako zewnętrzny przymus, lecz jako źródło potencjalnych korzyści ekonomicznych. Koszty związane z utrzymaniem standardów jakości powinny być elementem starannie zaplanowanej strategii, mającej na celu maksymalizację długoterminowych zysków. Efektywność wdrożonych systemów jakości musi być systematycznie zestawiana z ponoszonymi wydatkami na wszystkich poziomach operacyjnych oraz w całym cyklu życia produktu, co umożliwia optymalizację kosztów i wspiera trwały rozwój organizacji¹³⁴.

Znaczenie jakości w różnych obszarach organizacji jest złożone, obejmując wydajność operacyjną procesów, satysfakcję klientów, jakość świadczonych usług oraz zarządzanie danymi. Integracja systemów zarządzania jakością z działaniami operacyjnymi jest kluczowa dla budowania konkurencyjności i osiągnięcia trwałego sukcesu biznesowego. W obliczu rosnącej dynamiki rynków oraz złożoności współczesnego otoczenia biznesowego priorytetowe traktowanie jakości we wszystkich aspektach funkcjonowania przedsiębiorstwa staje się fundamentem długoterminowego wzrostu.

¹³¹ P.H.S. Panahy [i in.], *The impact of data quality dimensions on business process improvement*, w: *4th World Congress on Information and Communication Technologies (WICT 2014)*, 2014, s. 70–73.

¹³² F. Blanco-Encomienda, E. Rosillo-Díaz, J. Muñoz-Rosas, *Importance of Quality Control Implementation...*, s. 240–244.

¹³³ J.L. De La Vara [i in.], *An Empirical Study on the Importance of Quality Requirements in Industry*, w: *23rd International Conference on Software Engineering and Knowledge Engineering (SEKE 2011)*, 2011, s. 438–443.

¹³⁴ V. Firescu, J. Popescu, *The Costs of Quality: An Important Decision Tool*, „Journal of Economics and Business Administration” 2015, vol. 3, no. 4, s. 44–52.

1.6. Wprowadzenie do zasady Pareto

Wraz z rozwojem nowych technologii i pojawieniem się Przemysłu 4.0 kluczową rolę w zarządzaniu jakością odgrywa narzędzie, którego korzenie sięgają XIX wieku. Vilfredo Pareto, włoski ekonomista i socjolog, opracował koncepcję, która stała się podstawą zasady Pareto, znanej również jako zasada 80/20¹³⁵. Zasada ta mówi, że w wielu analizowanych przypadkach około 80% skutków wynika z 20% przyczyn. Warto podkreślić, że zasada znajduje zastosowanie w szerokim zakresie dziedzin, takich jak ekonomia, nauki społeczne, biznes czy opieka zdrowotna – nie jest wyłącznie związana z produkcją. Jej heurystyczny charakter ma szczególne znaczenie w ustalaniu priorytetów, alokacji zasobów i podejmowaniu decyzji. Pareto zauważył, że bogactwo w społeczeństwie jest rozdzielone nierównomiernie – 80% bogactwa przypada na 20% populacji¹³⁶. Znaczenie narzędzia zostało podkreślone przez American Society for Quality (ASQ), które uznaje je za jedno z siedmiu podstawowych narzędzi wykorzystywanych w doskonaleniu procesów¹³⁷.

W dziedzinie epidemiologii zasada Pareto umożliwia głębsze zrozumienie dynamiki przenoszenia chorób. Badania przeprowadzone przez Lernerę i współautorów wskazują, że niewielki odsetek populacji może być odpowiedzialny za znaczną liczbę infekcji. Wykorzystanie tej zasady w tym kontekście ułatwia definiowanie i wdrażanie skuteczniejszych działań interwencyjnych w kontrolowaniu ognisk epidemii¹³⁸. Podobne wnioski przedstawili Woolhouse i in., wykazując, że eliminacja 20% najbardziej efektywnych w transmisji choroby kontaktów może znacząco obniżyć wartość podstawowej liczby reprodukcyjnej¹³⁹.

W zarządzaniu organizacją zasada Pareto pomaga w skutecznym ustalaniu priorytetów, szczególnie w zakresie alokacji zasobów i realizacji kluczowych działań. Pozwala skoncentrować wysiłki na obszarach o największym znaczeniu, co sprzyja

¹³⁵ J.V.D. Poll, L. Chen, *Strategic Priorities for Employees Deviate from the Widely-employed Pareto's Law*, „International Journal of Economics, Business and Management Research” 2022, vol. 6, no. 5, s. 10–18.

¹³⁶ R. Sanders, *The Pareto Principle: its use and abuse*, „Journal of Services Marketing” 1987, vol. 1, s. 37–40; V. Pareto, *The New Theories of Economics*, „Journal of Political Economy” 1897, vol. 5, no. 4, s. 485–502.

¹³⁷ M. Alkiayat, *A Practical Guide to Creating a Pareto Chart as a Quality Improvement Tool*, „Global Journal on Quality and Safety in Healthcare” 2021, vol. 4, no. 2, s. 83–84.

¹³⁸ A. Lerner [i in.], *Spread of KPC-producing carbapenem-resistant Enterobacteriaceae: the importance of super-spreaders and rectal KPC concentration*, „Clinical Microbiology and Infection” 2015, vol. 21, no. 5, s. 470–e1.

¹³⁹ M. Woolhouse [i in.], *Epidemiological implications of the contact network structure for cattle farms and the 20–80 rule*, „Biology Letters” 2005, vol. 1, no. 3, s. 350–352.

osiąganiu lepszych wyników i zwiększa efektywność zarządzania¹⁴⁰. W kontekście zarządzania jakością wspomaga identyfikację głównych źródeł problemów oraz kierowanie działań na obszary wymagające doskonalenia, co przyczynia się do usprawnienia procesów¹⁴¹.

Zasada Pareto znajduje również zastosowanie w mikrobiologii środowiskowej. Badania Timmisa i in. wykazały, że niewielka część populacji drobnoustrojów ma znaczący wpływ na pozyskiwanie zasobów, co oddziałuje na dynamikę rozwoju oraz procesy ewolucyjne całej społeczności mikroorganizmów¹⁴². Zrozumienie tej zależności jest kluczowe przy opracowywaniu strategii zarządzania ekosystemami mikrobiologicznymi w sektorach takich jak rolnictwo i biotechnologia, w których interakcje mikroorganizmów odgrywają fundamentalną rolę.

Zasada Pareto znajduje zastosowanie w wielu niszowych sektorach, w tym również w bibliotekach. Badania przeprowadzone przez Yi i Shieha wykazały, że niewielki procent materiałów bibliotecznych odpowiada za większość ich wykorzystania. Wnioski z tych badań mogą posłużyć do opracowania strategii wspierających świadome decyzje dotyczące rozwoju kolekcji oraz właściwego umiejscawiania zasobów¹⁴³.

Podobne wnioski dotyczą zasadności stosowania zasady Pareto w sektorze łańcucha dostaw. Fichtinger i in. zwracają uwagę na to, że segmentacja zasobów oparta na zmienności i wielkości popytu wpływa na wzrost efektywności operacyjnej. Wykorzystując zasadę Pareto, możliwa staje się bardziej precyzyjna estymacja przy podejmowaniu decyzji, co prowadzi do usprawnienia procesów oraz pozwala skupić się na kluczowych elementach, które mają największy wpływ na wydajność¹⁴⁴.

Matematyczne podstawy zasady Pareto zostały szczegółowo zbadane w kontekście problemów optymalizacyjnych, z uwzględnieniem jej kluczowej roli w optymalizacji wielokryterialnej, gdzie konieczne jest uwzględnienie kompromisów między różnymi

¹⁴⁰ R.C. Craft, C. Leake, *The Pareto principle in organizational decision making*, „Management Decision” 2002, vol. 40, no. 8, s. 729–733.

¹⁴¹ J.V.D. Poll, L. Chen, *Strategic Priorities...*, s. 10–18.

¹⁴² K.N. Timmis [i in.], *The Pareto principle: To what extent does it apply to resource acquisition in stable microbial communities and thereby steer their geno-/ecotype compositions and interactions between their members?*, „Environmental Microbiology” 2023, vol. 25, no. 7, s. 1221–1231.

¹⁴³ Y. Yi, J.C. Shieh, *Is there the Pareto principle in public library circulation? A case study of one public library in Taiwan*, „Information Science” 2019, vol. 24, no. 2, s. 97–113.

¹⁴⁴ J. Fichtinger, C. Chan, N.E. Yates, *A joint network design and multi-echelon inventory optimisation approach for supply chain segmentation*, „International Journal of Production Economics” 2019, vol. 209, s. 103–111.

celami. Zastosowanie tego narzędzia umożliwia skuteczne poruszanie się w złożonych systemach, charakteryzujących się konkurencyjnymi wymaganiami¹⁴⁵.

Pomimo szerokiego zastosowania zasada Pareto nie jest wolna od krytyki. Istnieje przekonanie, że zasada 80/20 nadmiernie upraszcza złożoność niektórych systemów, co może prowadzić do zniekształcenia danych i błędnych interpretacji. Singson i Hangsing w przeprowadzonym badaniu wskazują, że zasada ta nie zawsze precyzyjnie odzwierciedla specyficzne niuanse danej sytuacji. Dlatego ważne jest, aby w praktyce stosować zasadę Pareto z rozwagą, uwzględniając unikatowe cechy analizowanych systemów¹⁴⁶. Mimo swoich ograniczeń zasada Pareto wciąż pozostaje niezwykle skutecznym narzędziem umożliwiającym zrozumienie i zarządzanie złożonymi systemami¹⁴⁷. Jej zastosowanie w zarządzaniu organizacją, naukach o zdrowiu czy ochronie środowiska podkreśla wszechstronność i uniwersalność. Zwraca ona uwagę na kluczowe, dominujące czynniki, które w największym stopniu wpływają na wynik, co z kolei umożliwia usprawnienie procesów decyzyjnych, ich optymalizację oraz efektywne wykorzystanie zasobów.

1.7. Zastosowanie zasady Pareto w zarządzaniu jakością

W zarządzaniu jakością kluczowe znaczenie ma identyfikacja głównych przyczyn problemów w celu zapewnienia efektywności operacyjnej. W tym kontekście zasada Pareto, zaadaptowana do zarządzania jakością przez Jurana, stała się ważnym narzędziem umożliwiającym organizacjom skoncentrowanie się na eliminacji najważniejszych źródeł niezgodności. Według tej zasady 20% przyczyn odpowiada za 80% problemów, co pozwala na optymalizację procesów poprzez skierowanie zasobów na najbardziej krytyczne aspekty¹⁴⁸.

W kontekście zarządzania jakością procesów produkcyjnych implementacja zasady Pareto jest kluczowa dla analizy defektów produktów oraz identyfikacji głównych źródeł błędów. Istotną rolę odgrywa również analiza przestojów maszyn produkcyjnych, która umożliwia identyfikację czynników najbardziej wpływających na wydajność. Skupiając

¹⁴⁵ J. Legriel [i in.], *Approximating the Pareto Front of Multi-criteria Optimization Problems*, „Lecture Notes in Computer Science” 2010, vol. 6015, s. 69–83.

¹⁴⁶ M. Singson, P. Hangsing, *Implication of 80/20 Rule in Electronic Journal Usage of UGC-Infonet Consortia*, „The Journal of Academic Librarianship” 2015, vol. 41, no. 2, s. 207–219.

¹⁴⁷ A. Kwilinski, M. Kardas, *The role of the Pareto principle in quality management within Industry 4.0: A comprehensive bibliometric analysis*, „Virtual Economics” 2024, vol. 7, no. 3, s. 7–24.

¹⁴⁸ J.M. Juran, *Juran on Leadership for Quality...*, s. 28–80.

działania naprawcze i optymalizacyjne na najważniejszych przyczynach problemów, zasada Pareto prowadzi do efektywniejszego zarządzania zasobami oraz minimalizacji marnotrawstwa¹⁴⁹.

W zarządzaniu jakością wykres Pareto, oparty bezpośrednio na tej zasadzie, stanowi jedno z kluczowych narzędzi analitycznych. Znajduje szerokie zastosowanie w inżynierii projektowej, pozwalając na analizę specyficznych grup danych na podstawie częstotliwości ich występowania. Analiza ta koncentruje się na połączeniu rozkładów częstotliwości z ich skumulowanym rozkładem, co umożliwia lepsze zrozumienie dominujących czynników wpływających na jakość¹⁵⁰.

Oprócz zasady Pareto, uznawanej za jedno z fundamentalnych narzędzi doskonalenia procesów, wyróżnia się także inne teorie, które oferują odmienne podejścia do zarządzania jakością. Przykładami mogą być prawo malejących przyrostów (*the law of diminishing returns*) oraz zasada równomiernego rozkładu (*the principle of equal distribution*).

Prawo malejących przyrostów, zakłada, że po osiągnięciu pewnego poziomu postępu każda kolejna jednostka wysiłku przynosi coraz mniejsze korzyści. W kontekście zarządzania jakością oznacza to, że osiągnięcie bardziej specyficznych, mniejszych celów jakościowych może wiązać się z koniecznością poniesienia nieproporcjonalnie większych nakładów zasobów¹⁵¹. Zasada podkreśla trudności związane z eliminacją mniejszych problemów, które mogą wymagać znacznych zasobów do usunięcia. Jest to odwrotność zasady Pareto, która zakłada, że niewielka liczba kluczowych działań przynosi największe rezultaty.

Zasada równomiernego rozkładu sugeruje natomiast, że wysiłki i wyniki są rozłożone równomiernie, co oznacza, że każdy wkład w poprawę procesów przekłada się na proporcjonalny wzrost jakości. W zarządzaniu jakością implikuje to, że każda jednostka wysiłku inwestowana w poprawę procesów produkcyjnych lub usługowych przynosi proporcjonalne korzyści jakościowe. W przeciwieństwie do zasady Pareto, która

¹⁴⁹ D. Radson, A.H. Boyd, *The Pareto Principle...*, s. 223–229.

¹⁵⁰ S. Anil Kumar, *Knowledge based selection in Soft Computing Models using Pareto Charts and Pareto Principle*, „International Journal of Research in Engineering and Technology” 2016, vol. 5, s. 1–10; C.N.E. Roriz, S. Sousa, *Application of Lean Production Principles and Tools for Quality Improvement of Production Processes in a Carton Company*, „Procedia Manufacturing” 2017, vol. 11, s. 1069–1076.

¹⁵¹ R. Shephard, R. Färe, *The Law of Diminishing Returns*, „Zeitschrift für Nationalökonomie” 1974, vol. 34, s. 60–69; S. Brue, *Retrospectives The Law of Diminishing Returns*, „Journal of Economic Perspectives” 1993, vol. 7, s. 185–192; G. Fogarty, L. Stankov, *Challenging the ‘Law of diminishing returns’*, „Intelligence” 1995, vol. 21, s. 157–174; A. Ahmad [i in.], *Quantifying the ‘Law of Diminishing Returns’ in Magnetically Controlled Growing Rods*, „Spine Deformity” 2017, vol. 5, 452.

zakłada nierównomierny rozkład efektów, zasada równomiernego rozkładu promuje bardziej zrównoważony i przewidywalny model poprawy procesów.

Obie opisane teorie oferują unikatowe podejścia do zarządzania jakością. Zasada Pareto umożliwia identyfikację i koncentrację na kluczowych obszarach, które generują największe korzyści, co jest szczególnie przydatne w początkowych etapach optymalizacji procesów, z kolei prawo malejących przyrostów podkreśla wyzwania związane z eliminacją mniejszych problemów jakościowych, które mogą wymagać nieproporcjonalnie dużych zasobów. Zasada równomiernego rozkładu jest natomiast najbardziej adekwatna w kontekście ciągłej, równomiernej poprawy procesów, gdzie każde działanie przynosi przewidywalne i proporcjonalne rezultaty.

Implementacja zasady 80/20 w zarządzaniu jakością stanowi istotny element rozwoju metod doskonalenia procesów. W literaturze przedmiotu¹⁵² podkreśla się, że zasada ta umożliwia organizacjom koncentrację na kluczowych obszarach działalności, co prowadzi do bardziej efektywnego wykorzystania zasobów zarówno ludzkich, jak i finansowych. Badania Norlanda i in. potwierdzają, że niewielka liczba przyczyn odpowiada za większość problemów, co w ujęciu zastosowania zasady Pareto pozwala na optymalną alokację zasobów, zwiększając efektywność procesów organizacyjnych¹⁵³.

Znacząca rola zasady Pareto znajduje również odzwierciedlenie w zarządzaniu jakością totalną, gdzie wspiera identyfikację kluczowych czynników sukcesu¹⁵⁴. Wyniki badań wskazują, że skoncentrowanie działań na najistotniejszych elementach procesów korzystnie wpływa na wyniki przedsiębiorstw poprzez wspieranie ciągłego doskonalenia, zwiększanie zaangażowania pracowników oraz poprawę ogólnej efektywności¹⁵⁵. Ponadto autorzy podkreślają synergiczne powiązanie zasady Pareto z filozofią TQM, która kładzie nacisk na nieustanne doskonalenie procesów i produktów w celu spełniania oczekiwań klientów¹⁵⁶.

¹⁵² W.M.M. Filho [i in.], *Applying the seven basic quality tools to solve a quality issue in the manufacturing of electronic switches*, „Journal of Engineering Research” 2023, vol. 3, no. 20, s. 2–22.

¹⁵³ J.E. Norland [i in.], *Prairie Reconstruction Unpredictability and Complexity: What is the Rate of Reconstruction Failures?*, „Ecological Restoration” 2018, vol. 36, no. 4, s. 263–266.

¹⁵⁴ M. Alkiayat, *A Practical Guide...*, s. 83–84.

¹⁵⁵ Å. Rönnbäck, L. Witell, *The impact of quality management principles on business performance – A comparison between manufacturing and service organisations*, „Managing Service Quality” 2008, vol. 18, no. 6, s. 577–598.

¹⁵⁶ N. Yousef, F. Yousef, *Using total quality management approach to improve patient safety by preventing medication error incidences*, „BMC Health Services Research” 2017, vol. 17, no. 1, s. 1–16; Q. Li [i in.], *A New Method for Quality Analysis of Multi-Process Manufacture*, „2022 IEEE 22nd International Conference on Software Quality, Reliability, and Security Companion” 2022, s. 776–777.

Badanie Knotha stanowi przykład skutecznego zastosowania zasady Pareto w połączeniu z narzędziami statystycznej kontroli procesu, co umożliwia podejmowanie decyzji opartych na rzetelnych danych procesowych, eliminując ryzyko decyzji opartych wyłącznie na intuicji¹⁵⁷. Przegląd literatury wykazuje, że zasada Pareto jest silnie zintegrowana z metodami statystycznej kontroli procesu, co przyczynia się do zwiększenia efektywności systemów zarządzania jakością, zwłaszcza w kontekście analizy kluczowych trendów w tej dziedzinie.

Zastosowanie zasady Pareto wykracza poza tradycyjne podejścia do zarządzania jakością, co znajduje potwierdzenie w badaniach dotyczących systemów analizy zagrożeń i krytycznych punktów kontroli (HACCP) w przemyśle spożywczym. Zasada ta wspiera identyfikację istotnych punktów kontrolnych, przyczyniając się do podniesienia standardów bezpieczeństwa żywności¹⁵⁸.

1.7.1. Analiza bibliometryczna

Głównym celem przeprowadzonej analizy bibliometrycznej jest ocena wpływu zasady Pareto na zarządzanie jakością. Analiza bibliometryczna, jako metoda eksploracji i analizy dużych zbiorów danych naukowych, umożliwia zrozumienie ewolucji badanego zagadnienia¹⁵⁹. Jest postrzegana jako podejście zwiększające rygorystyczność przeglądów literatury, a jednocześnie zmniejszające wpływ stronniczości badaczy, co czyni ją ważnym elementem w procesie metaanalizy¹⁶⁰. Stanowi narzędzie syntezy wiedzy, którego celem jest ilościowa analiza dużych zbiorów danych bibliometrycznych, pozwalając na wyciągnięcie kluczowych wniosków w kontekście badanej problematyki.

Aby proces wyszukiwania i klasyfikacji źródeł literaturowych był przejrzysty i obiektywny, całość opiera się na wytycznych PRISMA (*preferred reporting items for systematic reviews and meta-analyses*). Wytyczne te stanowią integralną część procesu, umożliwiając systematyczne podejście do przeglądu, selekcji oraz oceny danych literaturowych, zapewniając zgodność z kryteriami rzetelności i transparentności.

¹⁵⁷ S. Knoth, *Statistical process control*, praca doktorska, Humboldt-Universität zu Berlin, Wirtschaftswissenschaftliche Fakultät, 2005, s. 1–17.

¹⁵⁸ C. Fotopoulos, D. Kafetzopoulos, K. Gotzamani, *Critical factors for effective implementation of the HACCP system: a Pareto analysis*, „British Food Journal” 2011, vol. 113, no. 5, s. 578–597.

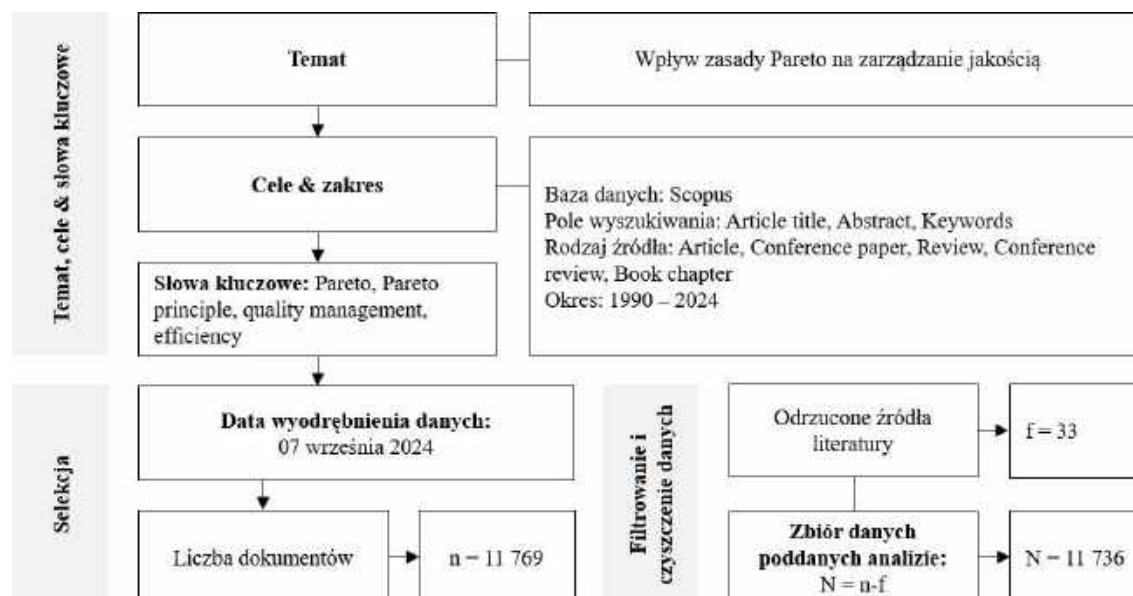
¹⁵⁹ N. Donthu [i in.], *How to conduct a bibliometric analysis: An overview and guidelines*, „Journal of Business Research” 2021, vol. 133, s. 285–296.

¹⁶⁰ I. Zupic, T. Čater, *Bibliometric Methods in Management and Organization*, „Organizational Research Methods” 2014, s. 429–472.

Analiza danych zgodnie z wytycznymi PRISMA obejmuje kilka następujących po sobie faz. Pierwsza koncentruje się na identyfikacji źródeł, w której ustalane są kryteria wyszukiwania i selekcji, obejmujące m.in. zdefiniowanie baz danych, słów kluczowych, ram czasowych oraz typów analizowanych materiałów (artykuły, publikacje naukowe, książki czy noty). Dane pozyskane na tym etapie poddawane są szczegółowej ocenie w celu określenia ich przydatności na podstawie przyjętych założeń (przegląd danych). Kolejna faza to szczegółowa ocena wyodrębnionych badań pod kątem kompletności i jakości (ocena kwalifikacyjna). Badania spełniające przyjęte kryteria są poddawane dalszej analizie, która ukierunkowana jest na potwierdzenie reprezentatywności zbioru danych dla danego obszaru badawczego (etap włączenia). Ostatni etap skupia się na identyfikacji wzorców oraz struktury wzajemnych powiązań w wyselekcjonowanym zbiorze danych (analiza danych). Wyniki końcowe są przedstawiane w raporcie podsumowującym¹⁶¹.

Na rysunku 1.1 przedstawione zostały wytyczne PRISMA w ujęciu badania wpływu zasady Pareto na obszar zarządzania jakością. Diagram odzwierciedla poszczególne etapy procesu przeglądu bazy literatury, ukazując proces selekcji i oceny danych.

Rysunek 1.1. Wytyczne PRISMA w ujęciu badania wpływu zasady Pareto na zarządzanie jakością



Źródło: opracowanie własne na podstawie danych z bazy Scopus (7.09.2024)

¹⁶¹ A. Kwilinski, *Mapping Global Research on Green Energy and Green Investment: A Comprehensive Bibliometric Study*, „Energies” 2024, vol. 17, no. 5, 1119.

Analiza bibliometryczna obejmuje zbieranie i analizę danych, wybór narzędzia wizualizacyjnego, graficzne przedstawienie zależności oraz interpretację wyników. Do jej przeprowadzenia zastosowano program VOSviewer v.1.6.19, który jest ogólnodostępnym oprogramowaniem służącym do tworzenia i przeglądania map bibliometrycznych. VOSviewer kładzie nacisk na graficzną prezentację informacji, co jest szczególnie użyteczne przy analizie dużych zbiorów danych, ułatwiając ich interpretację¹⁶². Program umożliwia również wizualizację słów kluczowych na podstawie współwystępowania zależności między autorami lub krajami, na przykład w kontekście liczby cytowań¹⁶³.

Ważnym elementem właściwej interpretacji jest jakość analizowanych danych. Zostały one zaczerpnięte z obszernej bazy artykułów naukowych Scopus, która indeksuje treści z różnorodnych dyscyplin, takich jak nauki ścisłe, technologia, medycyna oraz nauki społeczne. Przedział czasowy analizy obejmuje lata 1990–2024. Wyniki wyszukiwania zawierają wyszczególnione frazy i słowa kluczowe – *Pareto*, *Pareto principle*, *quality management* oraz *efficiency*. Uwzględniając powyższe ograniczenia, całkowita liczba publikacji wygenerowanych z bazy Scopus wyniosła 11 769 pozycji. Z dalszej analizy wykluczone zostały łącznie 33 indeksy przypisane do następujących kategorii: wycofany (*retracted*) (11), książka (*book*) (8), artykuł redakcyjny (*editorial*) (6), list (*letter*) (3), errata (*erratum*) (2), nieokreślony (*undefined*) (1), krótka ankieta (*short survey*) (1), artykuł z danymi (*data paper*) (1). Ekstrakcja danych ograniczyła liczbę analizowanych pozycji do 11 736.

Analiza ilościowa próby w ujęciu badania wpływu zasady Pareto na obszar zarządzania jakością w okresie od 1990 r. do 2024 r. przedstawia wykładniczy wzrost liczby indeksów – rysunek 1.2. Estymując dane dla 2024 r., można założyć, że liczba pozycji przekroczy wartość osiągniętą w 2023 r., która wynosiła 1008 (stan na 7.09.2024). Tempo wzrostu w latach 2022 i 2023 przekroczyło 10%.

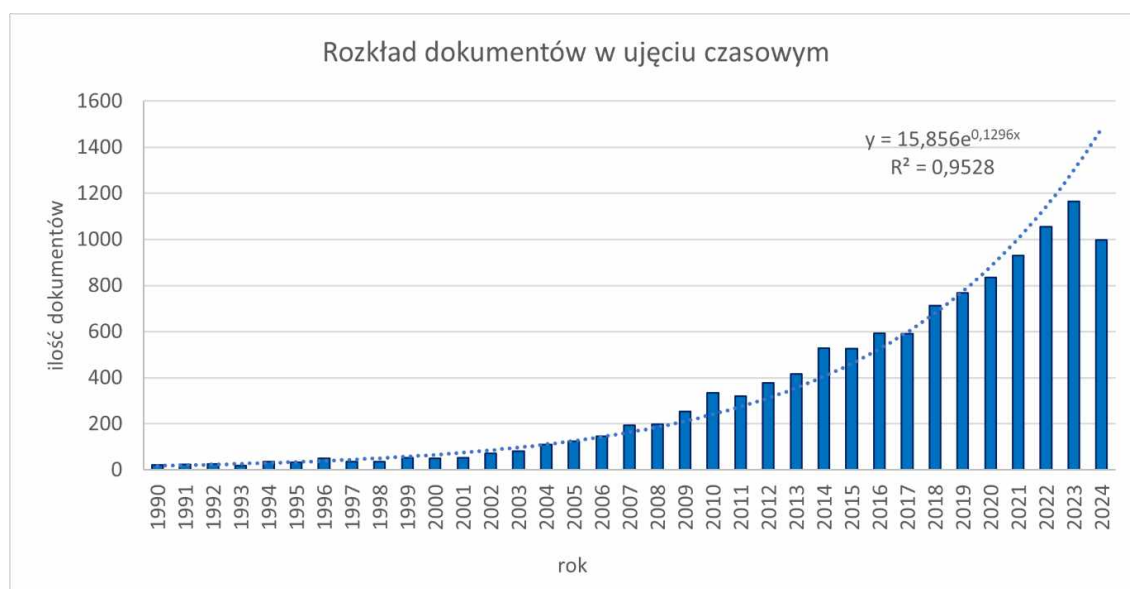
Na rysunku 1.3 przedstawiono rozkład indeksów w odniesieniu do organizacji oraz programów finansujących badania skupiające się na analizowanej tematyce oceny wpływu zasady Pareto na zarządzanie jakością. Należy podkreślić, że dominująca część prac przypisana jest do National Natural Science Foundation of China (1717). Kolejną

¹⁶² N. Eck, L. Waltman, *Software survey: VOSviewer: A computer program for bibliometric mapping*, „Scientometrics” 2009, vol. 84, s. 523–538.

¹⁶³ A. Kwiliński, *The Relationship between Sustainable Development and Digital Transformation: Bibliometric Analysis*, „Virtual Economics” 2023, vol. 6, no. 3, s. 56–69.

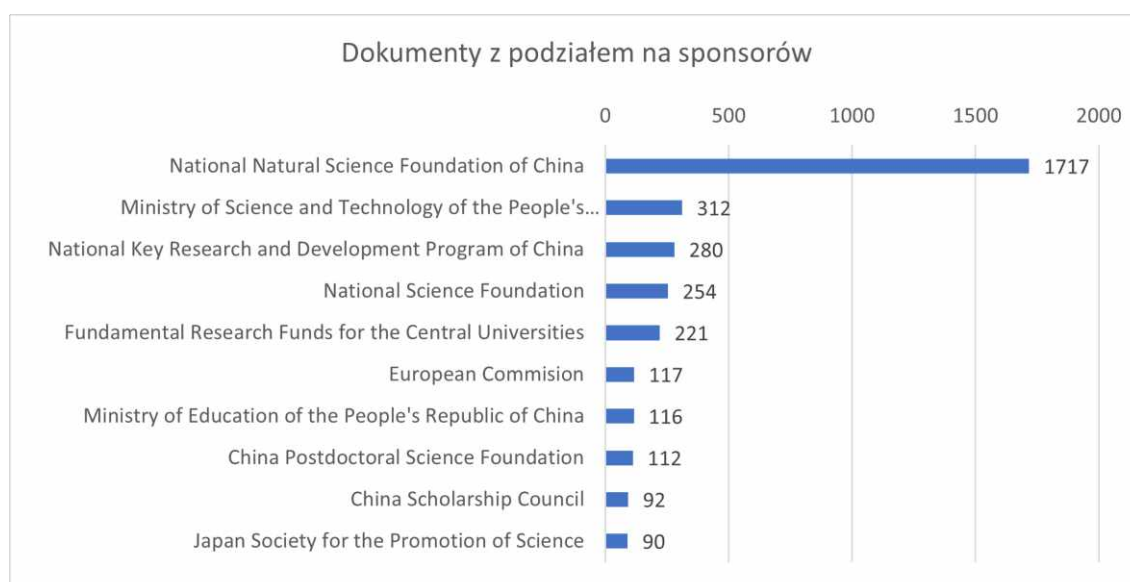
pozycję zajmuje Ministry of Science and Technology of the People's Republic of China (312). Trzecia pozycja przypisana jest do National Key Research and Development Program of China (280). Pierwszą europejską organizacją z największą liczbą dokumentów jest European Commission (117).

Rysunek 1.2. Rozkład dokumentów w ujęciu czasowym (1990–2024)



Źródło: opracowanie własne na podstawie danych z bazy Scopus (7.09.2024)

Rysunek 1.3. Rozkład dokumentów z podziałem na sponsorów – top 10 organizacji/programów



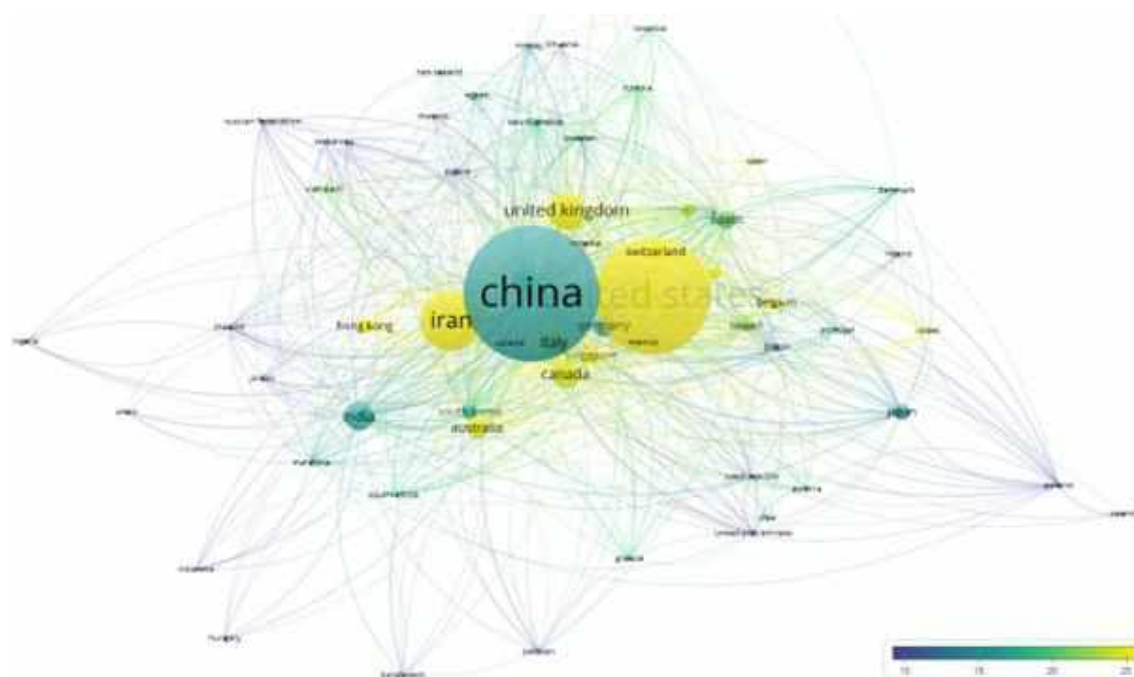
Źródło: opracowanie własne na podstawie danych z bazy Scopus (7.09.2024)

W dalszej analizie bibliometrycznej kluczowe znaczenie ma uwzględnienie pochodzenia publikacji w odniesieniu do ich liczby. Na rysunku 1.4 przedstawiono liczbę

publikacji za pomocą wielkości punktów, podczas gdy kolor wypełnienia określa średnią liczbę cytowań. Najwięcej artykułów przypisano autorom z Chin – 3951 dokumentów. Na drugim miejscu znajdują się naukowcy ze Stanów Zjednoczonych z liczbą 1960 pozycji, natomiast trzecie miejsce zajmuje Iran – 746 dokumentów.

Istotnym parametrem jest średni poziom cytowań. Pomimo tego, że Chiny charakteryzują się największą liczbą publikacji, średnia liczba cytowań na publikację wynosi około 15. W przypadku Stanów Zjednoczonych wartość kształtuje się na poziomie około 25, natomiast dla Iranu wskaźnik nieznacznie przekracza 32.

Rysunek 1.4. Liczba publikacji w odniesieniu do kraju pochodzenia z uwzględnieniem cytowań



Źródło: opracowanie własne na podstawie danych z bazy Scopus (7.09.2024), przy użyciu programu VOSviewer v.1.6.19

Dane przedstawione w tabeli 1.3 prezentują rozkład autorów z największą liczbą publikacji w obszarze badań nad wpływem zasady Pareto na zarządzanie jakością. Analiza wykazuje dominującą pozycję Kolar, J.W. – zarówno pod względem h-indeksu, który wynosi 103, jak i liczby publikacji bezpośrednio związanych z badanym obszarem. Wysoka wartość h-indeksu świadczy o częstym cytowaniu jego prac, co podkreśla ich znaczący wpływ na rozwój analizowanego obszaru wiedzy. Całkowita liczba jego publikacji wynosi 909, co również stanowi istotny wskaźnik jego aktywności naukowej.

Pod względem ogólnej liczby publikacji przeważa Koziel, S.M., który opublikował 1145 prac. Warto jednak zauważyć, że zarówno wskaźnik cytowalności, jak i liczba

publikacji bezpośrednio związanych z badaną tematyką są w jego przypadku znacząco niższe w porównaniu z osiągnięciami Kolar, J.W.

Przeprowadzona analiza uwypukla zróżnicowane podejścia poszczególnych autorów do badań nad zasadą Pareto i zarządzaniem jakością, jednocześnie podkreślając znaczenie takich wskaźników jak h-indeks w ocenie naukowego wpływu i dorobku badaczy.

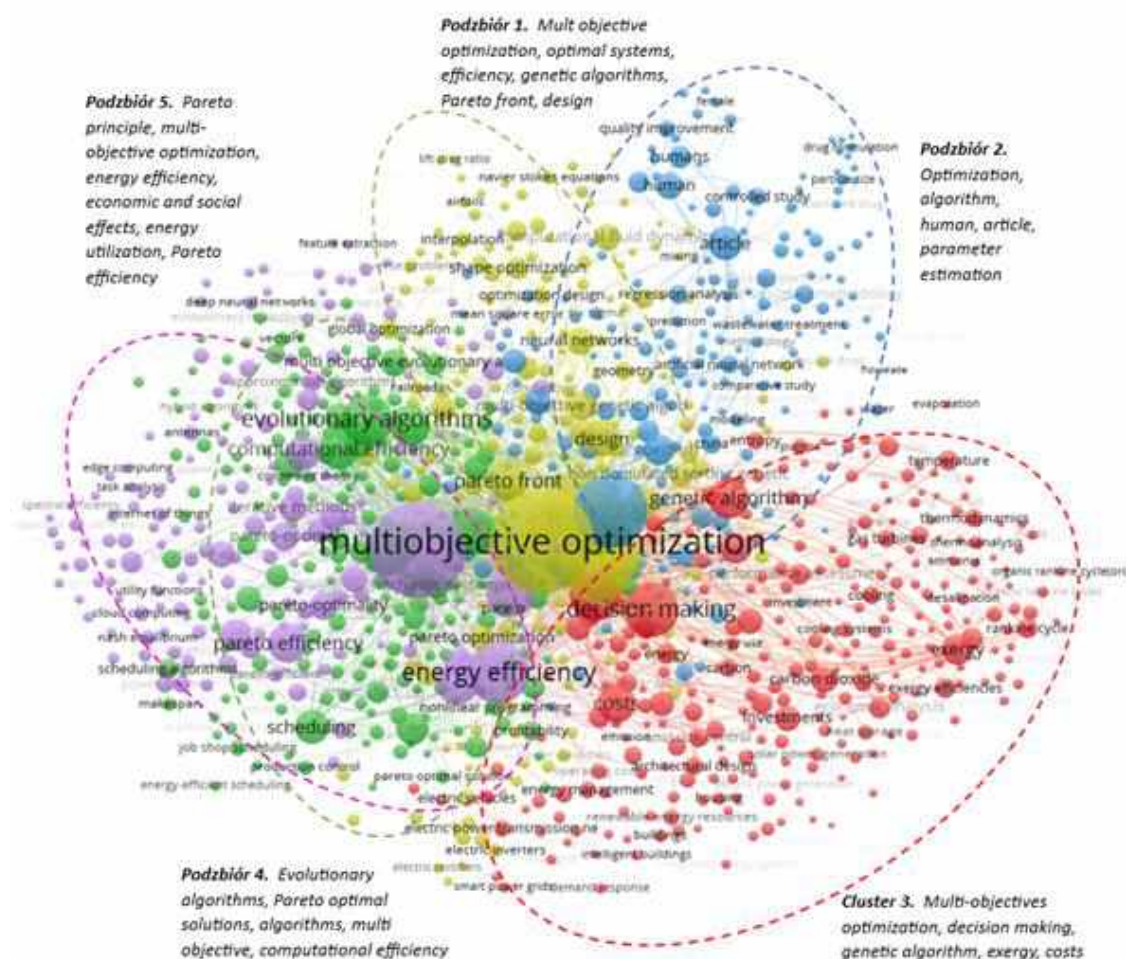
Tabela 1.3. Top 10 wiodących autorów na tematy obejmujące aspekty zasady Pareto i zarządzania jakością

Autorzy	Przynależność	h-Index	Liczba dokumentów	
			całkowita	związana z zasadą Pareto oraz zarządzaniem jakością
Kolar, J.W.	ETH Zurich, Zurich, Switzerland	103	909	46
Ahmadi, P.	Simon Fraser University, Burnaby, Canada	63	178	30
Tavakkoli-Maghaddam, R.	University of Tehran, Tehran, Iran	68	743	25
Kim, K.Y.	Inha University, Incheon, South Korea	53	380	23
Koziel, S.M.	Reykjavik University, Reykjavik, Iceland	55	1145	23
Yokoo, M.	Kyushu University, Fukuoka, Japan	36	345	22
Gao, L.	Huazhong University of Science and Technology, Wuhan, China	86	1035	20
Deb, K.	College of Engineering, East Lansing, United States	90	656	19
Ahmadi, M.H.	Qazvin University of Medical Sciences, Qazvin, Iran	71	401	18
Gen M.	Faculte de Medecine de Tunis, Tunis, Tunisia	59	451	18

Źródło: opracowanie własne na podstawie danych z bazy Scopus (7.09.2024)

Analiza bliskości oraz wzajemnych powiązań między słowami kluczowymi w wybranym zbiorze publikacji stanowi wartościowy element analizy bibliometrycznej (rysunek 1.5). Na podstawie zebranych danych wyodrębniono i opisano pięć głównych obszarów.

Rysunek 1.5. Analiza wzajemnej zależności w obrębie wyróżnionych słów kluczowych



Źródło: opracowanie własne na podstawie danych z bazy Scopus (7.09.2024), przy użyciu programu VOSviewer v.1.6.19

Pierwszy podzbiór, oznaczony kolorem żółtym, obejmuje 178 rekordów. Dominującym terminem jest *multiobjective optimization*, które występuje 4377 razy, a łączna siła połączeń wynosi 44 464. W ramach tego obszaru wyróżniają się również następujące słowa kluczowe: *optimal systems*, *efficiency*, *genetic algorithms*, *Pareto front* oraz *design*.

Kolejnym obszarem na mapie sieci neuronowej jest podzbiór 2, oznaczony kolorem niebieskim, obejmujący 189 rekordów. Wiodącym słowem kluczowym jest *optimization*, które pojawia się 2119 razy, a jego łączna siła połączeń wynosi 21 819. Do najczęściej występujących słów kluczowych należą także: *algorithm*, *human*, *article* oraz *parameter estimation*.

Trzeci podzbiór, w kolorze czerwonym, liczy 265 pozycji. Dominującym terminem jest *decision making*, które występuje w analizowanej próbce 1090 razy, z łączną siłą

Obszar analizy został podzielony na pięć okresów czasowych, mających na celu ukazanie ewolucyjnego charakteru wzajemnych zależności pomiędzy zasadą Pareto a zarządzaniem jakością w kontekście wielopłaszczyznowych powiązań między kluczowymi terminami istotnymi dla badanego obszaru wiedzy. Ważnym elementem staje się również zrozumienie wzajemnego przenikania się badanych terminów w ramach prowadzonej analizy.

Pierwszy z okresów, obejmujący lata 2016–2017, koncentruje się na takich słowach kluczowych jak: *optimization*, *Pareto optimal solution*, *evolutionary algorithms*, *design*, *multi-objective evolutionary* oraz *quality control*. W tym czasie ważne były techniki optymalizacyjne oraz algorytmy ewolucyjne stosowane w projektowaniu i zarządzaniu jakością.

Kolejny okres, przypadający na lata 2017–2018, obejmuje następujące dominujące słowa kluczowe: *Pareto principle*, *multi-objective optimization*, *efficiency*, *decision making*, *genetic algorithms* oraz *Pareto front*. Wzrasta rola algorytmów genetycznych oraz optymalizacji wielokryterialnej, które wspierały procesy decyzyjne.

Trzeci okres, obejmujący lata 2018–2019, koncentruje się na takich słowach kluczowych jak: *multi-objective optimization*, *sensitivity analysis*, *energy efficiency* oraz *exergy*. W tym czasie znaczenie zyskały optymalizacja energetyczna oraz analiza wrażliwości.

Okres od 2019 r. do 2020 r. stanowi czwarty etap analizy i charakteryzuje się dominacją takich terminów jak: *energy utilization*, *learning algorithms*, *performance*, *cost reduction* oraz ponownie występującego terminu *learning algorithms*. Rozwój algorytmów uczących się i optymalizacji kosztów przyczynił się do poprawy efektywności procesów.

Piąty okres obejmuje lata 2020–2024, a głównymi słowami kluczowymi tego okresu są: *optimization*, *multi-objective optimization*, *machine learning* oraz *many-objective optimization*. Wymienione terminy zwracają uwagę na nowoczesne techniki analizy danych w kontekście optymalizacji, optymalizacji wielokryterialnej oraz uczenia maszynowego, podkreślając tym samym istotny rozwój technologiczny w tych obszarach.

1.7.2. Ograniczenia realizowanych analiz oraz wnioski

Ze względu na swoją prostotę zasada Pareto znalazła szerokie zastosowanie w zarządzaniu jakością. Uznawana jest za narzędzie służące ustalaniu priorytetów oraz efektywnemu zarządzaniu zasobami. Mimo skuteczności jej implementacja nie jest pozbawiona ograniczeń, które mogą prowadzić do błędnej interpretacji danych i skupienia uwagi na czynnikach nieistotnych z perspektywy procesu, zwłaszcza w przypadku ich niewłaściwej identyfikacji.

Głównym ograniczeniem stosowania zasady Pareto w zarządzaniu jakością jest jej nadmierne uproszczenie. Zakłada ona, że 80% problemów wynika z 20% przyczyn, co może prowadzić do nieproporcjonalnego skupiania się na zidentyfikowanych problemach, pomijając te, które, mimo swojego znaczenia, nie zostały poprawnie rozpoznane. Zasada Pareto opiera się na założeniu liniowego związku między przyczynami a skutkami. W złożonych systemach, charakteryzujących się współzależnościami i nieliniowymi interakcjami, takie założenie może być niewystarczające. W wielu branżach relacje między czynnikami są bardziej skomplikowane, co sprawia, że przekonanie o tym, iż niewielka liczba przyczyn generuje większość skutków, może prowadzić do nadmiernego uproszczenia rzeczywistości. Konieczne jest uwzględnienie złożoności tych zależności, aby uniknąć błędnych wniosków i decyzji. Khan i in. wskazują, że w opiece zdrowotnej, mimo skoncentrowania działań na problemach zgodnych z rozkładem Pareto, może dojść do przeoczenia mniej powszechnych, ale ważnych kwestii wpływających bezpośrednio na bezpieczeństwo pacjentów¹⁶⁴. Takie podejście może dawać fałszywe poczucie bezpieczeństwa, gdy organizacje są przekonane o kompleksowym rozwiązaniu problemów jakościowych, podczas gdy kluczowe elementy pozostają nieprzeanalizowane.

Stosowanie zasady Pareto może prowadzić do nadmiernego skupienia się na zidentyfikowanych problemach, sprzyjając reaktywnemu podejściu do zarządzania jakością. Takie działanie może ograniczać inicjatywy prewencyjne oraz doskonalące, które nie zostały uwzględnione w analizie. W rezultacie istnieje ryzyko pominięcia

¹⁶⁴ A. Khan, T.C. Biggs, M. Faoury, *Improving the allocation of junior doctor resources using a Pareto analysis of pager activity*, „International Journal of Otorhinolaryngology and Head and Neck Surgery” 2018, vol. 5, no. 1, s. 1.

kwestii kluczowych dla długoterminowej efektywności i stabilności procesów organizacyjnych¹⁶⁵.

Integracja zasady Pareto z metodyką Six Sigma umożliwia dokładniejsze zrozumienie przyczyn źródłowych problemów. Stosowanie jej w izolacji może utrudniać pełną identyfikację rzeczywistych źródeł oraz skuteczne wdrożenie działań naprawczych. Połączenie z Six Sigma pozwala na bardziej szczegółowe określenie czynników mających wpływ na nieefektywność procesów, wspierając podejmowanie trafniejszych i trwalszych działań doskonalących¹⁶⁶.

Kolejnym ograniczeniem jest ryzyko niewłaściwej interpretacji danych. Skuteczność zasady Pareto zależy od precyzyjnego gromadzenia i analizy informacji, jednak organizacje często napotykają trudności w pozyskaniu wiarygodnych i kompletnych danych. Niepełne lub niedokładne informacje mogą prowadzić do błędnych wniosków i podejmowania niewłaściwych decyzji zarządczych¹⁶⁷. W małych i średnich przedsiębiorstwach brak solidnych systemów zarządzania danymi może utrudniać skuteczne stosowanie tej zasady. Ograniczone zasoby technologiczne i organizacyjne uniemożliwiają precyzyjne gromadzenie i analizę danych, prowadząc do błędów w identyfikacji kluczowych problemów. Ponadto w dynamicznych warunkach rynkowych istotność zidentyfikowanych kwestii może szybko się zmieniać, wymuszając regularną, ponowną ocenę priorytetów. Brak elastyczności w tym zakresie może skutkować nieadekwatnym alokowaniem zasobów i obniżeniem efektywności zarządzania jakością¹⁶⁸.

Analizując wpływ zasady Pareto na zarządzanie jakością, należy przyjąć podejście holistyczne, nieograniczające się do wybranych elementów, ale uwzględniające całość procesu. Ważne jest także ciągłe monitorowanie, ponieważ nadmierne poleganie na identyfikacji przyczyn na podstawie pojedynczego działania może sprawić, że organizacje zaniedbają inne potencjalne problemy. Może to prowadzić do obniżenia ogólnych standardów jakości, co jest szczególnie istotne w sektorach takich jak lotnictwo czy opieka zdrowotna, gdzie nawet niewielki spadek jakości może mieć poważne

¹⁶⁵ R.C. Craft, C. Leake, *The Pareto principle...*, s. 729–733.

¹⁶⁶ G. Singh, D. Singh, *CSFs for Six Sigma implementation: a systematic literature review*, „Journal of Asia Business Studies” 2020, vol. 14, no. 5, s. 795–818.

¹⁶⁷ S. Manulik, J. Rosińczuk, P. Karniej, *Evaluation of health care service quality in Poland with the use of SERVQUAL method at the specialist ambulatory health care center*, „Patient Preference and Adherence” 2016, vol. 10, s. 1435–1442.

¹⁶⁸ D. Zimon, *Analysis of the impact of standardized quality management system for the improvement of cooperation in the supply chain on the basis of small and medium-sized organizations*, „Journal of Positive Management” 2017, vol. 7, no. 2, s. 36.

konsekwencje¹⁶⁹. Całkowite poleganie na tej zasadzie może tworzyć błędną narrację o pełnej kontroli, co w konsekwencji przekłada się na spowolnienie działań w obszarze ciągłego doskonalenia oraz osłabienie czujności w praktykach zarządzania jakością¹⁷⁰.

Pomimo znaczącej roli zasady Pareto w zarządzaniu jakością jej ograniczenia – takie jak nadmierne uproszczenie złożonych systemów, reaktywne podejście zamiast proaktywnego, wyzwania związane z jakością danych, założenia liniowe oraz ryzyko utraty czujności – podkreślają potrzebę głębszego zrozumienia procesów. Prowadzi to do wniosku o konieczności uzupełnienia zasady innymi narzędziami, które pozwolą w pełni monitorować efektywność działań. Wśród nich należy wyróżnić choćby analizę przyczyn źródłowych czy rozwój ciągłego doskonalenia. Kompleksowe podejście do zarządzania jakością umożliwia skuteczniejsze rozwiązywanie problemów, co przyczynia się zarówno do rozwoju organizacji i poprawy jej wyników, jak i do wzrostu satysfakcji klientów.

1.8. Podsumowanie

1. Zarządzanie jakością obejmuje systematyczne działania mające na celu zapewnienie, że produkty i usługi realizowane w obrębie organizacji nie tylko spełniają określone standardy jakości, ale także odpowiadają na zróżnicowane potrzeby klientów, przyczyniając się do budowania przewagi konkurencyjnej i zrównoważonego rozwoju.
2. Zasada Pareto jest wykorzystywana w zarządzaniu jakością do identyfikacji głównych źródeł problemów, umożliwiając organizacjom skupienie się na kluczowych obszarach i efektywną alokację zasobów w celu maksymalizacji efektów doskonalenia.
3. Joseph M. Juran wprowadził koncepcję trylogii jakości, obejmującą planowanie jakości, jej kontrolę oraz doskonalenie. Zwrócił uwagę na znaczenie zaangażowania najwyższego kierownictwa w procesy jakościowe oraz wykorzystanie narzędzi statystycznych w celu ciągłego doskonalenia.
4. 14 zasad zarządzania jakością opracowanych przez W.E. Deminga, które akcentują ciągłe doskonalenie, orientację na klienta, zaangażowanie wszystkich pracowników

¹⁶⁹ N. Yousef, F. Yousef, *Using total quality management approach...*, s. 1–16.

¹⁷⁰ H.B. Gershengorn, R. Kocher, P. Factor, *Management strategies to effect change in intensive care units: lessons from the world of business*, „Annals of the American Thoracic Society” 2014, vol. 11, no. 3, s. 444–453.

oraz systemowe podejście do zarządzania, stanowiąc podstawę dla zarządzania jakością totalną.

5. Współczesne zarządzanie jakością integruje zaawansowane technologie, takie jak choćby sztuczna inteligencja i Internet rzeczy, co umożliwia automatyzację monitorowania procesów w czasie rzeczywistym, proaktywne podejście do zarządzania ryzykiem oraz zwiększa efektywność decyzji.
6. Jakość jest pojęciem wielowymiarowym, definiowanym różnie, w zależności od kontekstu – w edukacji odnosi się do efektywności kształcenia, w opiece zdrowotnej do poziomu świadczonych usług, a w produkcji do zgodności z określonymi standardami i oczekiwaniami klientów.
7. Istnieje wzajemna zależność między jakością a produktywnością. Optymalizacja procesów jest niezbędna do osiągnięcia równowagi między tymi dwoma elementami, pozwala bowiem uniknąć kompromisów jakości na rzecz zwiększenia produktywności i odwrotnie.
8. Analiza bibliometryczna wskazuje na rosnące zainteresowanie w obszarze wpływu zasady Pareto na zarządzanie jakością, co odzwierciedla wzrost liczby publikacji naukowych i podkreśla jej znaczenie zarówno w praktyce, jak i teorii zarządzania.
9. Brak odpowiedzialnej implementacji zasady Pareto prowadzi do nadmiernego uproszczenia złożonych systemów, ryzyka niewłaściwej interpretacji danych oraz skupienia się na najbardziej oczywistych problemach, może prowadzić do pominięcia istotnych, lecz mniej widocznych przyczyn wpływających na jakość.
10. TQM integruje wszystkie poziomy organizacji w dążeniu do doskonałości jakościowej, kładąc nacisk na kulturę organizacyjną sprzyjającą ciągłemu doskonaleniu, zaangażowanie pracowników oraz orientację na klienta.
11. Lean Management koncentruje się na maksymalizacji wartości dla klienta poprzez eliminację marnotrawstwa w procesach, wykorzystując narzędzia takie jak 5S, *just-in-time* czy mapowanie strumienia wartości, co prowadzi do zwiększenia efektywności operacyjnej.
12. Six Sigma wykorzystuje zaawansowane narzędzia statystyczne do redukcji zmienności procesów i eliminacji defektów, dążąc do osiągnięcia poziomu jakości poniżej 3,4 defektu na milion okazji, co przekłada się na znaczący wzrost jakości i produktywności.

13. Integracja strategii Lean i Six Sigma w formie Lean Six Sigma łączy eliminację marnotrawstwa z redukcją zmienności procesów, wnosząc kompleksowe podejście do ciągłego doskonalenia i optymalizacji procesów.
14. Podczas implementacji koncepcji zarządzania jakością organizacje mogą napotykać na takie bariery jak opór pracowników wobec zmian, brak zaangażowania kierownictwa, ograniczenia kulturowe oraz niedostateczne zasoby finansowe i techniczne, utrudniając tym samym efektywne wdrożenie strategii jakościowych.
15. Sukces w implementacji strategii zarządzania jakością zależy od efektywnego przywództwa oraz kultury organizacyjnej ukierunkowanej na jakość, która wspiera zaangażowanie pracowników i promuje ciągłe doskonalenie.

ROZDZIAŁ 2. ANALIZA TEORETYCZNA METOD STATYSTYCZNEJ KONTROLI PROCESU I PROJEKTOWANIA EKSPERYMENTU W OBSZARZE JAKOŚCI

2.1. Znaczenie statystycznej kontroli procesu

Statystyczna kontrola procesu jest kluczowym elementem zarządzania jakością oraz doskonalenia procesów w różnych branżach. Teoretyczne podstawy SPC opierają się na technikach i narzędziach statystycznych, które umożliwiają organizacjom skuteczne monitorowanie i kontrolowanie procesów w czasie rzeczywistym, a także ich doskonalenie. Niniejszy rozdział przedstawia teoretyczne aspekty SPC, w tym jego historyczny rozwój, kluczowe pojęcia oraz podstawowe teorie statystyczne, które są integralnymi elementami wspierającymi ich stosowanie w zarządzaniu jakością.

Walter A. Shewhart jest uznawany za pioniera statystycznej kontroli procesu. W latach 20. XX wieku wprowadził koncepcję kart kontrolnych, które do dziś są podstawowym narzędziem SPC, stosowanym do monitorowania zmienności procesów w czasie¹⁷¹. Shewhart zwracał uwagę na konieczność rozróżnienia zmienności wynikającej z przyczyn specjalnych od zmienności naturalnej, czyli wbudowanej w proces, podkreślając, że zmienność stanowi nieodłączny element każdego procesu. Podstawy teoretyczne statystycznej kontroli procesu zakorzenione są w statystyce, w tym w analizie zmienności i zastosowaniu rozkładów prawdopodobieństwa. Jej głównym celem są stabilizacja procesu i poprawa jakości poprzez identyfikację oraz eliminację źródeł zmienności¹⁷². Karty kontrolne umożliwiają wizualizację wydajności procesu, co ułatwia podejmowanie decyzji na podstawie danych i dostosowywanie parametrów procesu, a limity kontrolne pozwalają określić, czy proces działa w akceptowalnych granicach¹⁷³.

W ostatnich latach praktyki SPC zostały zaadaptowane w różnych sektorach, takich jak produkcja, opieka zdrowotna, usługi i technologie informacyjne. Szczególnie istotne

¹⁷¹ A.H. Zaludova, Z. Režný, M. Ullrich, *A survey of some recent Czechoslovak work in automatic statistical process control*, „Journal of Applied Probability” 1968, vol. 5, no. 1, s. 43–54.

¹⁷² J.W.D. Li, M.F. Chan, *Predictive quality assurance for linear accelerator target failure using statistical process control*, „Biomedical Physics & Engineering Express” 2023, vol. 9, no. 5, 55018.

¹⁷³ P. Wang [i in.], *Statistical Process Control Based on Kalman Filter in Manufacturing Process*, „Advanced Materials Research” 2011, vol. 201, s. 986–989.

jest zastosowanie SPC w opiece zdrowotnej, gdzie kontrola statystyczna przyczyniła się do poprawy wyników pacjentów poprzez analizę procesów klinicznych¹⁷⁴. Integracja SPC ze strategiami takimi jak Six Sigma czy Lean zwiększyła jej skuteczność oraz rozszerzyła zakres zastosowań w różnych środowiskach¹⁷⁵.

Rozwój technologii i metod statystycznych wzbogacił SPC o narzędzia do wielowymiarowej kontroli statystycznej procesu (MVSPC), co umożliwia jednocześnie monitorowanie wielu powiązanych zmiennych, oferując bardziej kompleksowy obraz wydajności procesu¹⁷⁶. Włączenie analityki predykcyjnej oraz technik uczenia maszynowego pozwala organizacjom na proaktywne podejmowanie działań korygujących na podstawie przewidywanych odchyłań w procesach¹⁷⁷.

Implementacja SPC nie jest jednak pozbawiona wyzwań oraz limitacji. Organizacje często napotykają opór wobec zmian, brak wiedzy statystycznej wśród pracowników oraz niedostateczne wsparcie ze strony kierownictwa. Badania pokazują, że kluczowe znaczenie odgrywa wspieranie kultury ciągłego doskonalenia oraz zapewnienie odpowiedniego szkolenia z zakresu metod i narzędzi statystycznych, co pomaga przezwyciężyć trudności i skutecznie wdrożyć SPC¹⁷⁸. Podczas wdrażania statystycznej kontroli procesu w różnych branżach kluczowe jest zastosowanie indywidualnego podejścia poprzez zastosowanie odpowiednich narzędzi. Na przykład małe i średnie przedsiębiorstwa mogą napotykać bariery oraz ograniczenia podczas implementacji SPC w porównaniu z dużymi organizacjami, co wymaga szczegółowego zrozumienia ich specyfiki oraz cech¹⁷⁹. Zdolność adaptacji jest kluczowa dla zapewnienia, że inicjatywy statystycznej kontroli procesu są skutecznie dostosowane do celów i możliwości organizacyjnych. Wiele organizacji boryka się z właściwym wdrożeniem SPC ze względu na brak zrozumienia jego zasad. Badania podkreślają, że skuteczna implementacja statystycznej kontroli procesu uwarunkowana jest odpowiednim poziomem zaangażowania kierownictwa, szkoleniem pracowników, a także odpowiednią integracją SPC z kulturą organizacji.

¹⁷⁴ T. Pawlicki, M.L. Whitaker, A.L. Boyer, *Statistical process control for radiotherapy quality assurance*, „Medical Physics” 2005, vol. 32, no. 9, s. 2777–2786.

¹⁷⁵ D.C. Montgomery, *A Retrospective on Volume 23 of Quality and Reliability Engineering International*, „Quality and Reliability Engineering International” 2008, vol. 24, no. 1, s. 1–2.

¹⁷⁶ J.F. MacGregor, T. Kourti, *Statistical process control of multivariate processes*, „Control Engineering Practice” 1995, s. 403–414.

¹⁷⁷ J.W.D. Li, M.F. Chan, *Predictive quality assurance...*

¹⁷⁸ R. Mahanti, J.R. Evans, *Critical success factors for implementing statistical process control in the software industry*, „Benchmarking: An International Journal” 2012, vol. 19, no. 3, s. 374–394.

¹⁷⁹ Tamże.

Podkreśla się także potrzebę ustrukturyzowanych ram kierujących wdrażaniem SPC w ramach systemów zarządzania jakością. Ramy koncepcyjne integrujące SPC z Lean, Six Sigma i TQM mogą zapewnić organizacjom kompleksowe wytyczne do osiągnięcia doskonałości jakości.

Statystyczna kontrola procesu to zbiór technik i narzędzi, które ewoluowały od początków teoretycznych do istotnego elementu zarządzania jakością. Prace pionierów, takich jak Shewhart, nadały kierunek rozwojowi SPC, przyczyniając się do zwiększenia jej skuteczności. W ujęciu ciągłego dążenia organizacji do poprawy wydajności procesów zasady SPC pozostają integralną częścią strategii zapewniania jakości.

Należy podkreślić, że SPC wieloaspektowo oddziałuje na filozofie zarządzania jakością. Działania w obszarze zapobiegania zamiast wykrywania niezgodności w procesie doskonale wpisują się w założenia Lean Manufacturing, które dążą do eliminowania marnotrawstwa i maksymalizacji wartości¹⁸⁰. Przykładem jest przemysł motoryzacyjny, w którym wdrożenie SPC poprawiło zdolność procesu oraz zmniejszyło jego zmienność, co doprowadziło do wyższej jakości produktów i zwiększenia satysfakcji klientów¹⁸¹.

Ponadto statystyczna kontrola procesu stanowi fundament strategii Six Sigma, dostarczając narzędzi statystycznych wykorzystywanych do identyfikacji przyczyn źródłowych wad oraz wdrażania działań naprawczych. SPC, jako podstawowy element tej struktury, zapewnia niezbędne możliwości analizy danych w aspekcie monitorowania wydajności procesu oraz utrzymania trwałych ulepszeń. Synergia między SPC a Six Sigma jest widoczna w ich wspólnym celu, jaki stanowi minimalizacja zmienności procesu i poprawa ogólnej jakości, co ostatecznie prowadzi do zwiększenia efektywności i lojalności klientów¹⁸².

W kontekście TQM statystyczna kontrola procesu jest charakteryzowana jako integralny element wspierający filozofię ciągłego doskonalenia. Zarządzanie jakością totalną zakłada zaangażowanie wszystkich pracowników w proces poprawy jakości, podczas gdy SPC dostarcza narzędzi niezbędnych do podejmowania decyzji opartych na

¹⁸⁰ C. Pascu, A. Didu, S. Gheorghe, *Study about the Application of Statistical Process Control for Process Quality Improvement in Automotive Industry*, „Applied Mechanics and Materials” 2020, vol. 896, s. 169–174.

¹⁸¹ Tamże.

¹⁸² D. Sisay, F. Verhees, J. Trijp, *Marketing activities as critical success factors: The case of seed producer cooperatives in Ethiopia*, „African Journal of Business Management” 2017, vol. 11, no. 19, s. 548–563.

danych¹⁸³. Wspierając kulturę jakości i odpowiedzialności, organizacje mogą wykorzystać SPC do wzmocnienia swoich inicjatyw TQM, co w konsekwencji prowadzi do poprawy wyników operacyjnych. Właściwa implementacja SPC w ramach TQM, podobnie jak w przypadku wszystkich filozofii zarządzania jakością, wymaga zaangażowania najwyższego kierownictwa w kształtowanie środowiska sprzyjającego poprawie jakości.

Dodatkowo wzajemne oddziaływanie między SPC a praktykami Lean jest umacniane przez koncepcję *total productive maintenance*, która jest ukierunkowana na zwiększenie efektywności i dostępności maszyn oraz urządzeń poprzez ograniczanie przestojów. Integracja SPC z TPM umożliwia organizacjom osiągnięcie szerokiego, holistycznego podejścia w zarządzaniu jakością, koncentrując się zarówno na wydajności procesów, jak i na niezawodności maszyn. Takie zintegrowane podejście nie tylko zwiększa efektywność procesów, ale także wspiera kulturę ciągłego doskonalenia, niezbędną do osiągnięcia długoterminowego sukcesu¹⁸⁴.

Znaczący wpływ SPC na filozofie zarządzania jakością jest aspektem złożonym. Dostarczając narzędzi do podejmowania decyzji opartych na danych oraz wspierając ciągłe doskonalenie, statystyczna kontrola procesu zwiększa ich skuteczność, przyczyniając się do ogólnego sukcesu organizacji. Pomyślne wdrożenie SPC wymaga jednak całościowego podejścia, które uwzględnia kluczowe czynniki sukcesu, takie jak zaangażowanie kierownictwa, szkolenia pracowników oraz integracja zaawansowanych technologii. W obliczu złożoności nowoczesnych środowisk biznesowych zastosowanie narzędzi statystycznych pozostaje istotnym elementem wysiłków organizacji w zakresie zarządzania jakością.

2.2. Narzędzia statystycznej kontroli procesu

Podstawowym założeniem statystycznej kontroli procesu jest wykorzystanie danych jako źródła wiedzy, umożliwiającego organizacjom właściwą identyfikację i rozróżnienie odchyleń występujących w procesie – oddzielenie dopuszczalnych

¹⁸³ W. Sun, J. Ma, M. Liang, *Research on Quality Control of Medical Device Production Process*, „International Journal of Materials, Mechanics and Manufacturing” 2019, vol. 7, no. 3, s. 133–137.

¹⁸⁴ C. Yang [i in.], *Increasing detectability in semiconductor foundry by multivariate statistical process control*, „Total Quality management” 2008, vol. 19, no. 5, s. 429–440.

wartości od tych wskazujących na niewłaściwy przebieg¹⁸⁵. Niniejszy rozdział koncentruje się na przeglądzie narzędzi SPC, ich zastosowaniach oraz znaczeniu w kontekście poprawy wydajności operacyjnej.

SPC obejmuje szeroką gamę narzędzi statystycznych, z których najważniejsze są karty kontrolne. Umożliwiają one graficzną prezentację danych procesowych w ujęciu czasowym, co pozwala na identyfikację zmian, trendów czy anomalii w procesie. Należy podkreślić ich szerokie zastosowanie w wielu branżach, takich jak produkcja, opieka zdrowotna czy usługi. W sektorze opieki zdrowotnej doskonałym przykładem jest wykorzystanie kart kontrolnych do monitorowania zakażeń ran chirurgicznych, co umożliwiło wizualne przedstawienie danych procesowych i interwencję w odpowiednim czasie¹⁸⁶. Podobnie w obszarze produkcji narzędzia SPC są wykorzystywane do monitorowania procesów, zapewniając ich pozostawanie w określonych granicach kontrolnych i utrzymanie jakości wytwarzanych produktów. W branży oprogramowania narzędzia statystycznej kontroli procesu są stosowane do monitorowania i poprawy jakości procesów, a identyfikacja istotnych czynników sukcesu wspiera ich skuteczne wdrożenie¹⁸⁷.

Oprócz kart kontrolnych inne narzędzia SPC, takie jak histogramy, diagramy Pareto, wykresy punktowe czy diagramy Ishikawy, również odgrywają ważną rolę w zarządzaniu jakością. Histogramy zapewniają wizualizację rozkładu danych, co umożliwia identyfikację wzorców i potencjalnych problemów w procesie. Diagramy Pareto wspomagają natomiast identyfikację kluczowych problemów mających największy wpływ na jakość. Wykresy punktowe pozwalają na analizę zależności między zmiennymi, a diagramy Ishikawy, czyli przyczynowo-skutkowe, umożliwiają systematyczne identyfikowanie potencjalnych przyczyn problemów jakościowych poprzez kategoryzację źródeł problemów. Integracja tych narzędzi zwiększa zdolność organizacji do skutecznego monitorowania procesów i poprawy ich wydajności.

Znaczący wpływ na rozwój statystycznej kontroli procesu miało pojawienie się zaawansowanych technik statystycznych, takich jak wielowymiarowa statystyczna kontrola procesu (MSPC). MSPC pozwala na jednoczesne monitorowanie wielu

¹⁸⁵ M. Kang, K. Um, *Combining internal quality-oriented product design with external supplier involvement for enhancing operational performance: the moderating role of product modularity*, „Journal of Manufacturing Technology Management” 2023, vol. 34, no. 2, s. 337–358.

¹⁸⁶ J.C. Benneyan, *Statistical process control as a tool for research and healthcare improvement*, „Quality and Safety in Health Care” 2003, vol. 12, no. 6, s. 458–464.

¹⁸⁷ R. Mahanti, J.R. Evans, *Critical success factors...*, s. 374–394.

wzajemnie powiązanych zmiennych procesowych, co umożliwia lepsze zrozumienie i kontrolowanie złożonych procesów. W rezultacie możliwe jest bardziej efektywne zarządzanie zmiennością i optymalizacja procesu jako całości, wpływa bowiem na ogólną wydajność i jakość¹⁸⁸. To proaktywne podejście do zarządzania jakością jest zgodne z zasadami zarządzania jakością totalną, która podkreśla znaczenie zapobiegania defektom przed ich wystąpieniem, a nie tylko ich wykrywania.

Statystyczna kontrola procesu to zbiór narzędzi kluczowych dla organizacji dążących do poprawy wydajności procesów oraz utrzymania wysokiej jakości produktów. Wykorzystanie SPC w różnych sektorach, zwłaszcza w połączeniu z zaawansowanymi metodami analizy statystycznej, podkreśla jego istotność w zmiennym i konkurencyjnym środowisku biznesowym. Skuteczna implementacja SPC wymaga jednak nie tylko dogłębnego zrozumienia jego zasad, ale także zaangażowania w proces ciągłego doskonalenia oraz identyfikacji kluczowych czynników sukcesu, które wspierają jego efektywne wdrożenie. W obliczu rosnącej złożoności współczesnej produkcji i usług SPC odgrywa fundamentalną rolę w podnoszeniu jakości i efektywności operacyjnej, stanowiąc nieodłączny element strategii zarządzania procesami w nowoczesnych organizacjach.

2.2.1. Karty kontrolne

Karty kontrolne umożliwiają ocenę zgodności procesu pod kątem jego stabilności oraz wydajności w czasie rzeczywistym¹⁸⁹. Ich zasadniczym celem jest odpowiednio wczesne wykrywanie niepożądanych trendów i zachowań w procesie, które mogłyby stanowić czynnik inicjujący powstawanie defektów lub strat. Istota działania kart kontrolnych polega na tym, że nie opierają się one na złożonych modelach matematycznych. Predykcja wyników bazuje wyłącznie na danych procesowych uzyskanych w obrębie monitorowanego procesu.

Należy zaznaczyć, że użyteczność kart kontrolnych wykracza poza standardowe monitorowanie. Odgrywają one również istotną rolę w inicjatywach doskonalenia procesów, w ramach takich filozofii jak Six Sigma czy zarządzanie jakością totalną, zapewniając ramy do identyfikacji i łagodzenia źródeł zmienności¹⁹⁰. Klasyfikacja kart

¹⁸⁸ M. Sánchez, C.R. Alvarez, A. Brandolin, *A multivariate statistical process control procedure for BIAS identification in steady-state processes*, „AIChE journal” 2008, vol. 54, no. 8, s. 2082–2088.

¹⁸⁹ P. Qiu, *Statistical Process Control Charts...*, s. 123–138.

¹⁹⁰ T.G. Chetter, *Statistical process control part 2: using statistical process control to measure process improvement in patient flow*, „Australian Health Review” 2009, vol. 33, no. 3, s. 412–422.

kontrolnych dzieli je na karty zmiennych oraz karty atrybutów. Karty kontrolne zmiennych, takie jak $\bar{X}$ -R, są stosowane, gdy cecha jakościowa ma wymiar liczbowy, podczas gdy karty kontrolne atrybutów są używane do danych kategorycznych, takich jak kryteria zaliczenia/niezaliczenia. To rozróżnienie ma kluczowe znaczenie, ponieważ wpływa na wybór odpowiedniego rodzaju narzędzia oraz właściwą interpretację wyników. Projektowanie i wdrażanie kart kontrolnych wiąże się z kilkoma kluczowymi kwestiami, w tym z wyborem wielkości próby i częstotliwości gromadzenia danych.

Karty kontrolne $\bar{X}$ -R stanowią najbardziej powszechny typ narzędzi, szeroko wykorzystywanych do monitorowania wartości średnich (karta $\bar{X}$) i zmienności procesów (karta R) w różnych branżach. Wykresy te służą jako podstawowe instrumenty kontroli jakości, umożliwiając organizacjom wykrywanie szczególnych przyczyn zmienności i utrzymanie stabilności procesu. Karta kontrolna $\bar{X}$ koncentruje się na wartościach średnich z próbki, co pozwala monitorować średnie wartości zmiennej obserwowanej, podczas gdy karta kontrolna R przedstawia wartości rozstępu z próbki, które otrzymywane są w rezultacie kolejnych badań zmienności dla określonej zmiennej. Konstrukcja kart $\bar{X}$ i R obejmuje linie centralną – średnia arytmetyczna ze średnich dla karty $\bar{X}$ oraz średniego rozstępu dla karty R, a także górną i dolną granicę kontrolną, które definiują dopuszczalny zakres zmienności.

Granice kontrolne są zwykle ustalane na poziomie $\pm 3\sigma$ (odchyleń standardowych) od średniej, co odpowiada około 99,73-proc. przedziałowi ufności przy założeniu normalnego rozkładu danych¹⁹¹. Wskazana wartość wynika przede wszystkim z faktu, że zastosowanie granic trzech odchyleń standardowych umożliwia efektywne rozróżnienie między zmiennością naturalną a zmiennością specjalną. Dodatkowo należy zaznaczyć, że takie wyznaczenie granic kontrolnych stanowi równowagę pomiędzy ryzykiem wystąpienia błędu typu I oraz II, czyli nadmiernej i niedostatecznej reakcji na zmiany w procesie. Ta podstawa statystyczna pozwala praktykom zidentyfikować warunki poza kontrolą, gdy punkty danych wykraczają poza wyznaczone limity, wskazując potencjalne problemy w procesie, które wymagają zbadania. Ważnym elementem jest fakt, że określenie limitów kontrolnych może wymagać korekt na podstawie specyfiki monitorowanego procesu¹⁹².

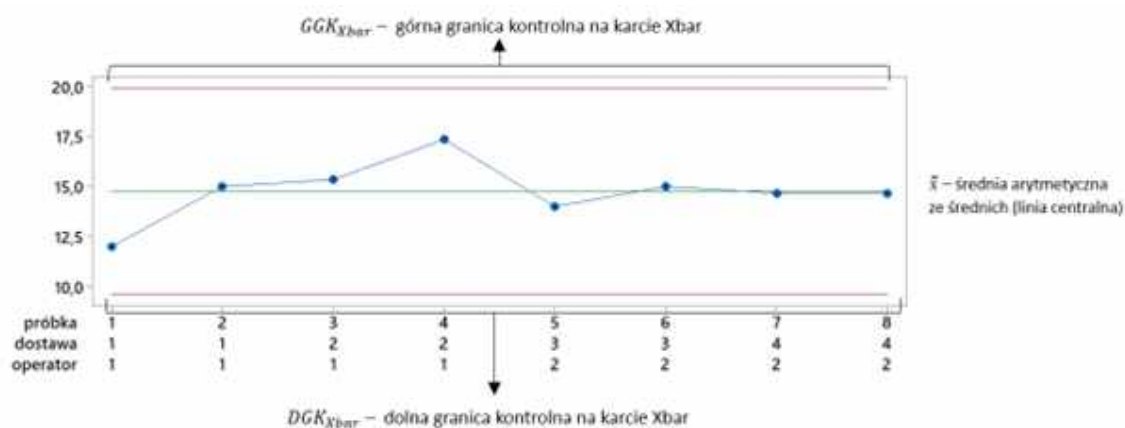
¹⁹¹ P. Luangpaiboon, *Weighted Centroid Modified Simplex and Linear Constrained Response Surface Optimization Methods for the $\bar{X}$ -R Chart Variable Determination*, „Journal of Computer Science” 2011, vol. 7, no. 6, s. 836–843.

¹⁹² I.D. Czabak-Górska, *The classification and characteristics of control charts*, „CBU International Conference Proceedings” 2017, vol. 5, s. 86–93.

Wspólne zastosowanie kart kontrolnych $\bar{X}$ i R jest szczególnie korzystne w środowiskach, w których zarówno średnia, jak i zmienność procesu muszą być równolegle monitorowane. Zastosowanie podejścia umożliwia organizacjom skuteczne zarządzanie jakością i stabilnością procesów, minimalizując ryzyko defektów i strat. Warto podkreślić, że karty kontrolne, jako narzędzia statystyczne, wspierają podejmowanie decyzji opartych na danych, co jest nieodzownym elementem nowoczesnego zarządzania procesami i jakością w dynamicznie zmieniającym się otoczeniu biznesowym.

Na rysunku 2.1 przedstawiono konstrukcję karty kontrolnej wartości średnich $\bar{X}$. Interpretacja kart $\bar{X}$ pozwala na właściwe określenie obszarów generujących największą zmienność w procesie. W przypadku gdy wszystkie punkty znajdują się w wyznaczonych granicach kontrolnych, wskazuje, że dominującym źródłem zmienności jest zmienność próbka do próbki (rysunek 2.1).

Rysunek 2.1. Konstrukcja karty kontrolnej wartości średnich $\bar{X}$



Źródło: opracowanie własne przy użyciu programu Minitab Statistical Software 22

Granice kontrolne dla karty kontrolnej $\bar{X}$ są obliczane za pomocą poniższych wzorów:

$$GGK_{\bar{X}} = \bar{\bar{x}} + A_2 \cdot \bar{R} \quad (1)$$

$$DGK_{\bar{X}} = \bar{\bar{x}} - A_2 \cdot \bar{R} \quad (2)$$

$$\bar{\bar{x}} = \frac{\sum_{i=1}^n \bar{x}_i}{n} \quad (3)$$

$$\bar{R} = \frac{\sum_{i=1}^k R_i}{k} \quad (4)$$

$\bar{\bar{x}}$ – średnia arytmetyczna ze średnich;

$\bar{x}_i$ – średnia arytmetyczna i-tej próbki;

n – liczba próbek;

$\bar{R}$ – średnia rozstępu;

R_i – i-ta wartość w zestawie danych;

k – liczba obserwacji;

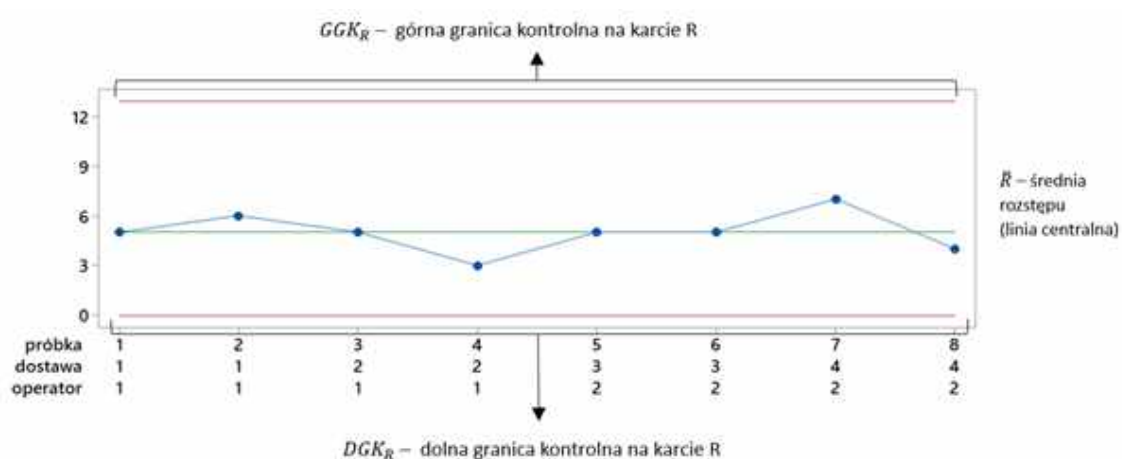
$GGK_{\bar{X}} - \text{g\kern-0.1em\text{r}na granica kontrolna na karcie Xbar};$

$DGK_{\bar{X}} - \text{dolna granica kontrolna na karcie Xbar};$

A_2 – stała zależna od liczności podgrup.

Rysunek 2.2 odpowiada strukturze karty kontrolnej rozstępu R. W przypadku kart rozstępu R, gdy przynajmniej jeden z punktów wykracza poza granice kontrolne, oznacza to wystąpienie zmienności specjalnej w procesie. Jeśli wszystkie punkty mieszczą się w wyznaczonych limitach, mamy do czynienia ze zmiennością naturalną, a sam proces jest spójny, stabilny i przewidywalny.

Rysunek 2.2. Konstrukcja karty kontrolnej rozstępu R



Źródło: opracowanie własne przy użyciu programu Minitab Statistical Software 22

Granice kontrolne dla karty kontrolnej R są obliczane za pomocą poniższych wzorów:

Średnia rozstępu wyliczana jest zgodnie ze wzorem (4).

$$GGK_R = D_4 \cdot \bar{R} \quad (5)$$

$$n < 7, DGK_R = 0 \quad (6)$$

$$n \geq 7, DGK_R = D_3 \cdot \bar{R} \quad (7)$$

n – liczba próbek;

$\bar{R}$ – średnia rozstępu;

GGK_R – górna granica kontrolna na karcie R;

DGK_R – dolna granica kontrolna na karcie R;

D_4 oraz D_3 – stałe zależne od liczności podgrup.

Wartości stałych A_2, D_3 oraz D_4 zależą od liczby obserwacji w podgrupie (tabela 2.1).

Tabela 2.1. Wartości stałych dla kart kontrolnych

Wielkość próby	A_2	D_3	D_4
2	1,880	0	3,267
3	1,023	0	2,574
4	0,729	0	2,282
5	0,577	0	2,114
6	0,483	0	2,004
7	0,419	0,076	1,924
8	0,373	0,136	1,864
9	0,337	0,184	1,816
10	0,308	0,223	1,777
11	0,285	0,256	1,744
12	0,266	0,283	1,717
13	0,249	0,307	1,693
14	0,235	0,328	1,672
15	0,223	0,347	1,653
16	0,212	0,363	1,637
17	0,203	0,378	1,622
18	0,194	0,391	1,608
19	0,187	0,403	1,597
20	0,180	0,415	1,585

Źródło: opracowanie własne na podstawie: PN-ISO 8258+AC1:1996 Karty kontrolne Shewharta

Kolejnym typem kart kontrolnych, które odgrywają istotną rolę w sytuacjach, gdy mamy do czynienia z pojedynczymi obserwacjami, a nie z podgrupami, są karty wartości

indywidualnych i ruchomego rozstępu (IMR). Podobnie jak w przypadku kart $\bar{X}$ -R głównym założeniem kart IMR jest ocena stabilności procesu poprzez analizę zmienności na podstawie pojedynczych punktów zebranych w czasie. Karta wartości indywidualnych I jest szczególnie przydatna, gdy dane są zbierane w postaci pojedynczych obserwacji, co umożliwia monitorowanie wydajności procesu w czasie rzeczywistym. Takie podejście pozwala na szybkie identyfikowanie nietypowych zachowań czy trendów w procesie¹⁹³.

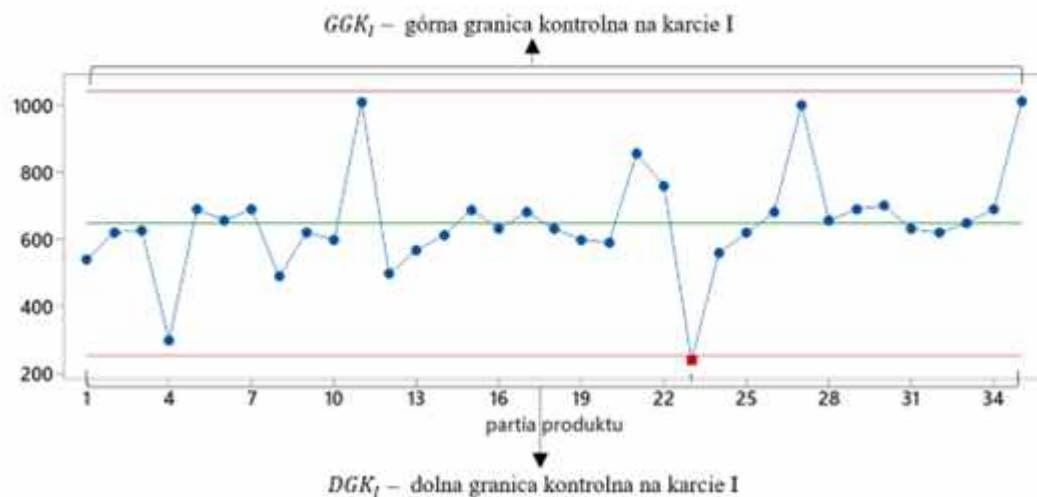
Karty kontrolne ruchomego rozstępu (MR) opierają się na kalkulacji ruchomego rozstępu pomiędzy kolejnymi obserwacjami, co umożliwia określenie, czy w procesie występuje zmienność specjalna, czy też zmienność ma charakter wyłącznie naturalny. Podobnie jak karty kontrolne wartości średnich i rozstępu karty wartości indywidualnych oraz ruchomego rozstępu stanowią kluczowe narzędzie statystycznej kontroli procesu, umożliwiające dokładną ocenę zachowań procesowych.

Umiejętność identyfikacji przyczyn specjalnych zmienności oraz odpowiednia reakcja w razie jej pojawienia się mają fundamentalne znaczenie dla utrzymania integralności procesów, co w efekcie prowadzi do poprawy wyników prowadzonych działań. Karty IMR nie tylko wspierają bieżące monitorowanie procesu, ale także dostarczają ram do systematycznego doskonalenia, umożliwiając właściwe zarządzanie jakością i stabilnością operacyjną.

W aspekcie kart kontrolnych wartości indywidualnych I, gdy przynajmniej jeden z punktów wykracza poza limity wyznaczone przez górną (GGK_I) lub dolną granicę kontrolną DGK_I , oznacza to wystąpienie zmienności długoterminowej ponad zmienność krótkoterminową (rysunek 2.3). Konieczne wówczas jest podjęcie działań ukierunkowanych na przyczyny źródłowe długoterminowej zmienności.

¹⁹³ S. Riley, A. Burhouse, T. Nicholas, *National Health Service (NHS) trust boards adopt statistical process control reporting: the impact of the Making Data Count Training Programme*, „BMJ Leader” 2021, vol. 5, no. 4, s. 252–257.

Rysunek 2.3. Konstrukcja karty kontrolnej rozstępu I



Źródło: opracowanie własne na przy użyciu programu Minitab Statistical Software 22

Granice kontrolne dla karty kontrolnej I są obliczane za pomocą poniższych wzorów:

$$\bar{I} = \frac{\sum_{i=1}^n I_i}{n} \quad (8)$$

$$\overline{MR} = \frac{\sum_{i=2}^n (X_i - X_{i-1})}{n - 1} \quad (9)$$

$$GGK_I = \bar{I} + 2,66 \cdot \overline{MR} \quad (10)$$

$$DGK_I = \bar{I} - 2,66 \cdot \overline{MR} \quad (11)$$

$\bar{I}$ – średnia arytmetyczna;

I_i – i-ta wartość w zestawie danych;

n – liczba obserwacji;

$\overline{MR}$ – średnia z ruchomego rozstępu;

x_i – i-ta wartość w zbiorze;

x_{i-1} – wartość bezpośrednio poprzedzająca i-tą wartość w zbiorze danych;

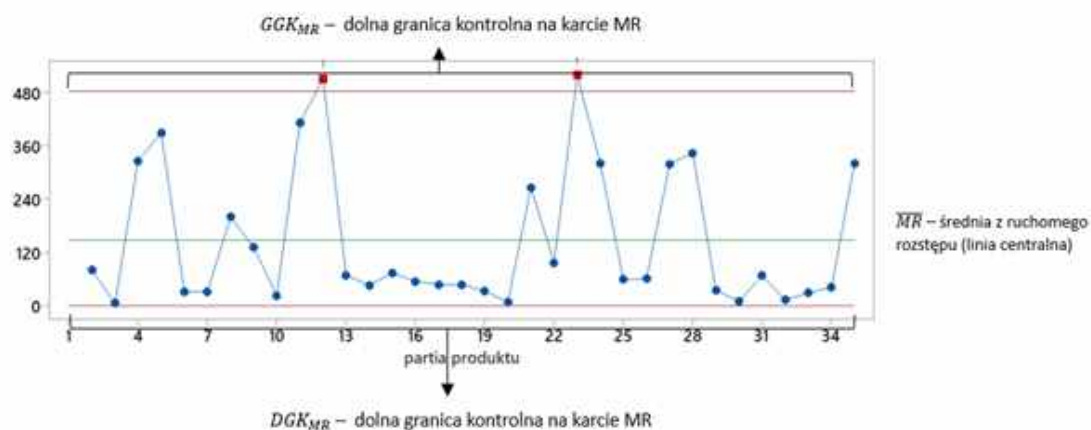
$n - 1$ – różnica pomiędzy kolejnymi obserwacjami;

GGK_I – górna granica kontrolna na karcie I;

DGK_I – dolna granica kontrolna na karcie I.

W przypadku karty kontrolnej ruchomego rozstępu MR, gdy przynajmniej jeden z punktów wykracza poza górną (GGK_{MR}) lub dolną (DGK_{MR}) granicę kontrolną, sygnalizowane jest wystąpienie przyczyny specjalnej w analizowanym procesie (rysunek 2.4). Jeśli wszystkie punkty mieszczą się w wyznaczonych granicach, świadczy to o obecności wyłącznie zmienności naturalnej.

Rysunek 2.4. Konstrukcja karty kontrolnej ruchomego rozstępu MR



Źródło: opracowanie własne przy użyciu programu Minitab Statistical Software 22

Limity kontrolne dla karty ruchomego rozstępu MR obliczane są na podstawie poniższych wzorów:

Ruchomy rozstęp ($\overline{MR}$) wyliczono zgodnie ze wzorem (9).

$$GGK_{MR} = \overline{MR} \cdot D_4 \quad (12)$$

$$DGK_{MR} = \overline{MR} \cdot D_3 = 0 \quad (13)$$

$\overline{MR}$ – średnia z ruchomego rozstępu;

GGK_{MR} – górna granica kontrolna na karcie MR;

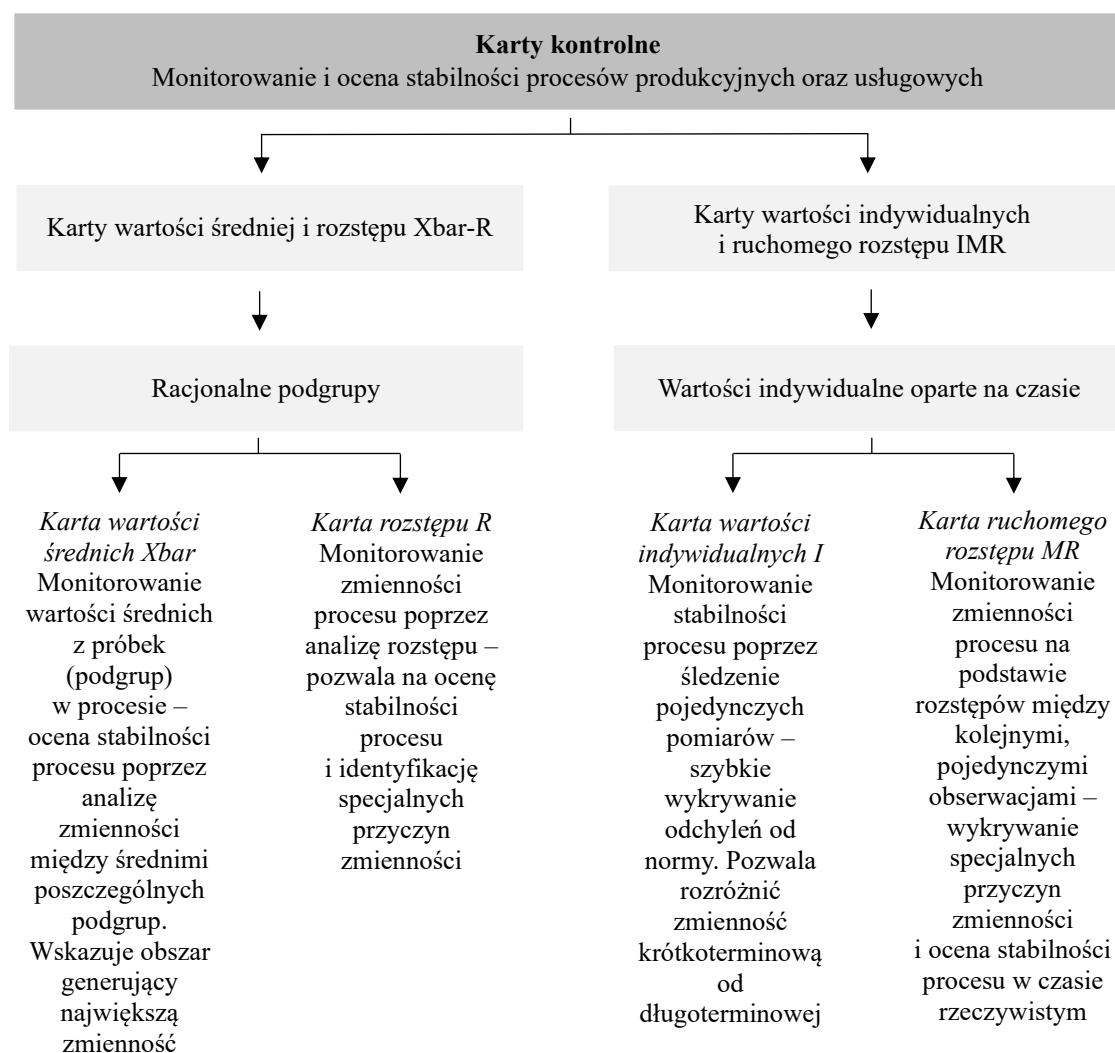
DGK_{MR} – dolna granica kontrolna na karcie MR.

Należy podkreślić, że wyliczając GGK_{MR} na karcie ruchomego rozstępu, wartość stałej D_4 wynosi 3,267. Wynika to z tablic wartości liczbowych przedstawionych w tabeli 2.1 dla dwóch obserwacji.

Jako że dla próby składającej się z dwóch obserwacji stała D_3 jest równa 0, dolna granica kontrolna DGK_{MR} również wynosi 0.

Na rysunku 2.5 przedstawiono podział kart kontrolnych w aspekcie ich finalnego przeznaczenia. Charakterystyce poddano karty kontrolne $\bar{X}$ oraz IMR.

Rysunek 2.5. Charakterystyka kart kontrolnych $\bar{X}$ -R i IMR



Źródło: opracowanie własne na podstawie: J. Koronacki, *Metody statystycznego sterowania jakością*, w: *Statystyka w przemyśle. Seminarium firmy StatSoft. Statsoft Polska*, StatSoft, 1999, s. 15–26

Głównym zadaniem kart kontrolnych $\bar{X}$ -R jest monitorowanie wartości średnich z próbek oraz analiza rozstępu, co pozwala określić stabilność procesu i zidentyfikować dominujący rodzaj zmienności. Należy podkreślić, że pomimo szerokiego zastosowania kart kontrolnych wartości średnich i rozstępu charakteryzują się one znaczącymi ograniczeniami w aspekcie ich stosowania. Jednym z kluczowych ograniczeń jest konieczność założenia normalnego rozkładu danych. W przypadku gdy dane procesowe

nie spełniają tego warunku, otrzymane rezultaty mogą prowadzić do błędnych konkluzji, zwiększając liczbę fałszywych alarmów lub powodując przeoczenie sygnałów wskazujących na niestabilność procesu¹⁹⁴. To samo ograniczenie dotyczy również kart IMR.

Kolejnym ważnym ograniczeniem, które może wpływać na skuteczność zaimplementowanych kart kontrolnych – zarówno Xbar-R, jak i IMR – jest zbyt mała wielkość próby. Może to prowadzić do niedokładnych oszacowań parametrów procesu, co stanowi poważne zagrożenie w kontekście wykrywania trendów lub specyficznych zachowań w procesie. Dlatego też, wykorzystując karty kontrolne, konieczne jest upewnienie się, że w obrębie analizowanego procesu uchwycono realną zmienność¹⁹⁵. Gdy wielkość próby jest niewielka, limity kontrolne mogą niedokładnie odzwierciedlać zmienność procesu, prowadząc do potencjalnych błędnych interpretacji danych.

W przypadku wykresów wartości indywidualnych i ruchomego rozstępu zwraca się uwagę na to, że karty kontrolne IMR koncentrują się na poszczególnych punktach danych. Może to prowadzić do nadmiernego skupienia na zmienności krótkoterminowej, z pominięciem zmienności długoterminowej. W rezultacie praktycy mogą przeoczyć istotne kwestie wymagające uwagi, ponieważ wykres może wskazywać na stabilność, podczas gdy proces w rzeczywistości dryfuje w czasie.

Pomimo że karty kontrolne Xbar-R oraz IMR zostały zaprojektowane w celu wykrywania zmienności specjalnej w procesie, należy zaznaczyć, że nie zawsze robią to skutecznie. Wykresy mogą niekiedy nie identyfikować zmian lub trendów w procesie, szczególnie w obecności szumu lub gdy proces jest z natury niestabilny¹⁹⁶. Ponadto karty kontrolne wartości indywidualnych i ruchomego rozstępu, a także wartości średnich i rozstępu mogą być podatne na fałszywe alarmy, prowadząc do niepotrzebnych badań i interwencji.

Innym znaczącym ograniczeniem wykresów IMR i Xbar-R jest problem bezwładności, gdzie wykresy mogą wykazywać opóźnioną reakcję na zmiany w procesie. Może to wystąpić, gdy statystyka wykresu znajduje się w pobliżu jednego z limitów

¹⁹⁴ S. Ali [i in.], *On developing sensitive nonparametric mixed control charts with application to manufacturing industry*, „Quality and Reliability Engineering International” 2021, vol. 37, no. 6, s. 2699–2723.

¹⁹⁵ Tamże.

¹⁹⁶ J.T. McLaren, A. Taher, L.B. Chartier, *Flattening the other curve: reducing emergency department STEMI delays during the COVID-19 pandemic*, „The American Journal of Emergency Medicine” 2021, vol. 49, s. 367–372.

kontrolnych, co powoduje opóźnienie w wykrywaniu zmian¹⁹⁷. Dodatkowo opieranie się na danych historycznych przy wyznaczaniu granic kontrolnych może potęgować tę kwestię, ponieważ może nie uwzględniać ostatnich zmian w procesie¹⁹⁸.

W celu wyeliminowania zidentyfikowanych ograniczeń w stosowaniu kart kontrolnych Xbar-R oraz IMR należy rozważyć użycie alternatywnych typów wykresów kontrolnych, które są bardziej odporne na niestandardowe rozkłady danych, takich jak karty sumy skumulowanej (CUSUM) czy wykładniczo ważona średnia ruchoma (EWMA)¹⁹⁹. Wymienione rozwiązania mogą stanowić alternatywę charakteryzującą się większą wrażliwością na zmiany procesowe. Należy jednak pamiętać, że ich skuteczność zależy od właściwego uwzględnienia potencjalnych zagrożeń, które mogłyby prowadzić do błędnego wnioskowania podczas interpretacji wyników procesowych.

Istotnym elementem pozostaje także kwestia zapewnienia odpowiedniej wielkości badanej próby. Organizacje powinny ustanowić protokoły zbierania danych, które będą odpowiadały całkowitej zmienności procesu – dopiero wówczas możliwe będzie rozpoczęcie właściwej analizy, aby mieć pewność, że wyznaczone limity kontrolne odpowiadają rzeczywistej zmienności procesu²⁰⁰.

Integracja analizy danych w czasie rzeczywistym i technik uczenia maszynowego może zwiększyć możliwości monitorowania wykresów kontrolnych. Wykorzystując zaawansowane metody statystyczne, organizacje mogą poprawić wykrywanie specyficznych zmian przyczyn i zmniejszyć wpływ potencjalnych błędów.

Pomimo faktu, że karty kontrolne IMR oraz Xbar-R są uznawane za istotne narzędzia w obszarze poprawy jakości, należy brać pod uwagę ich ograniczenia. Zwracając uwagę na takie aspekty jak właściwa wielkość analizowanej próby, normalność rozkładu danych oraz inne ograniczenia opisane w niniejszym rozdziale, kluczowe jest podejmowanie świadomych decyzji podczas interpretacji danych. Należy zaznaczyć, że implementacja alternatywnych typów kart kontrolnych, zapewnienie

¹⁹⁷ N.A. Saleh, M.A. Mahmoud, A.G. Abdel-Salam, *The Performance of the Adaptive Exponentially Weighted Moving Average Control Chart with Estimated Parameters*, „Quality and Reliability Engineering International” 2013, vol. 29, no. 4, s. 595–606.

¹⁹⁸ X. Zhang, W. Woodall, *Dynamic Probability Control Limits for Lower and Two-Sided Risk-Adjusted Bernoulli CUSUM Charts*, „Quality and Reliability Engineering International” 2017, vol. 33, no. 3, s. 607–616.

¹⁹⁹ K.A. Schmidtke [i in.], *Considering chance in quality and safety performance measures: an analysis of performance reports by boards in English NHS trusts*, „BMJ Quality & Safety” 2017, vol. 26, no. 1, s. 61–69.

²⁰⁰ A.A. Boroiu [i in.], *The Influence of Sample Size on Long-Term Performance of a 6σ Process*, „Processes” 2023, vol. 11, no. 3, 779.

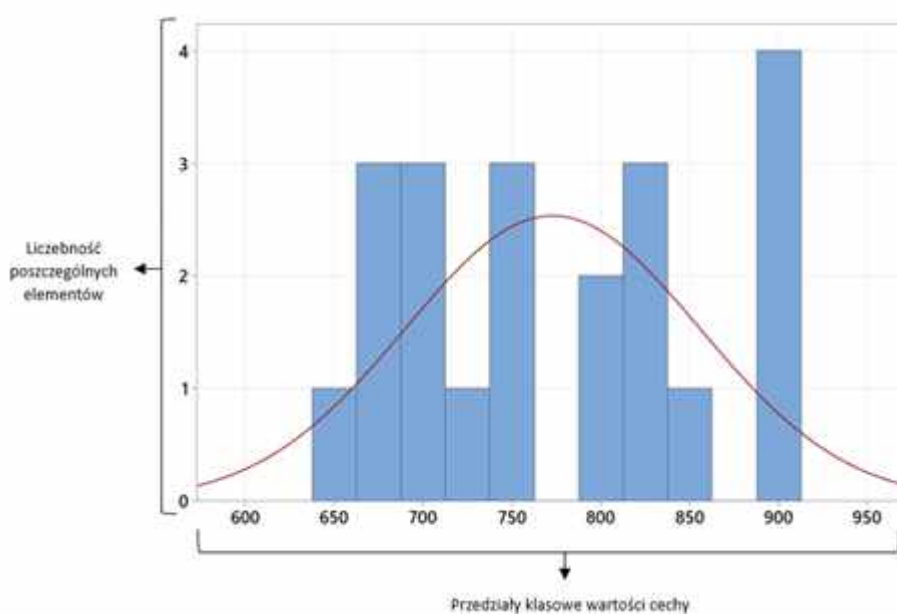
odpowiedniej wielkości próby oraz integracja zaawansowanej analityki mogą zwiększyć skuteczność tych narzędzi w różnych warunkach.

2.2.2. Histogram

Histogram to narzędzie, które umożliwia graficzne przedstawienie rozkładu cech ilościowych. Struktura histogramu składa się z szeregu prostokątów umiejscowionych wzdłuż osi poziomej. Prostokąty odpowiadają określonym przedziałom klasowym wartości cechy, a ich wysokość odzwierciedla liczebność elementów zakwalifikowanych do danego przedziału²⁰¹.

Na rysunku 2.6 przedstawiono budowę histogramu wraz z opisem poszczególnych elementów składowych.

Rysunek 2.6. Budowa histogramu



Źródło: opracowanie własne przy użyciu programu Minitab Statistical Software 22

Histogramy pozwalają na wizualizację określonej zmiennej procesowej, co ma istotne znaczenie dla identyfikacji trendów oraz zmian w czasie²⁰². Ponadto mogą one wskazywać na ważne cechy analizowanego zbioru danych, takie jak tendencja centralna,

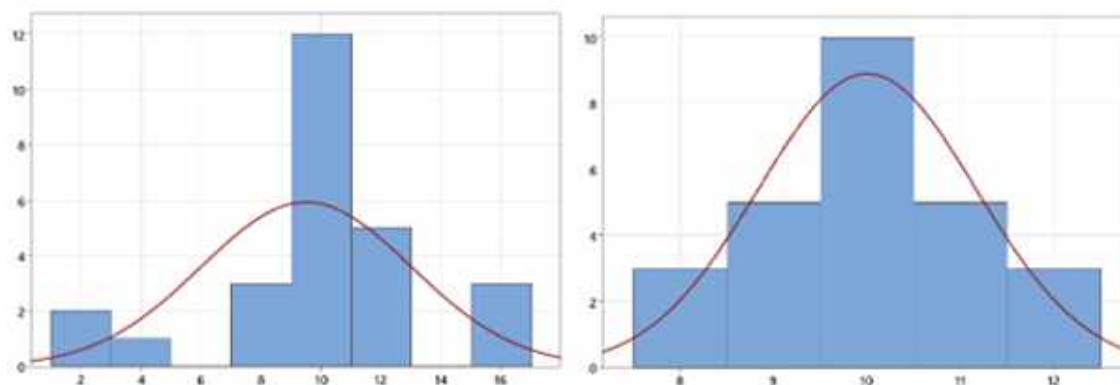
²⁰¹ S.M. Meyers, M. Balderson, D. Létourneau, *Evaluation of Elekta Agility multi-leaf collimator performance using statistical process control tools*, „Journal of Applied Clinical Medical Physics” 2019, vol. 20, no. 7, s. 100–108.

²⁰² A.R. Fazeli, E.S. Tashnizi, *Statistical Control and Investigation of Capability of Process and Machine in Wire Cut EDM Process of Gas Turbine Blade Airfoil Tip*, „Engineering” 2011, vol. 3, no. 3, s. 260–265.

zmiennosc czy obecność obserwacji odstających. Analizując kształt histogramu, można stwierdzić, czy dane mają rozkład normalny, czy też charakteryzują się asymetrią.

Na rysunku 2.7 przedstawiono przykłady odpowiadające rozkładowi normalnemu (wykres po prawej stronie) oraz przypadek, który znacząco odbiega od jego założeń (wykres po lewej stronie).

Rysunek 2.7. Przykłady rozkładu danych – histogram

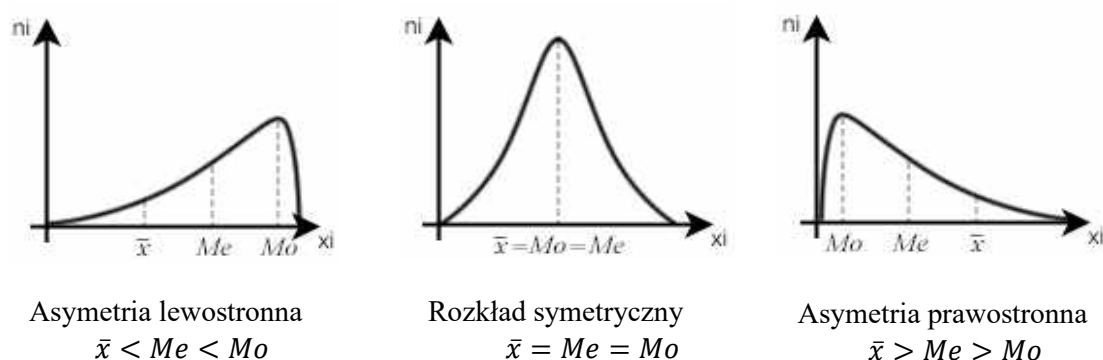


Źródło: opracowanie własne przy użyciu programu Minitab Statistical Software 22

Należy podkreślić, że rozróżnienie między rozkładem normalnym a tym, który od niego odbiega, stanowi istotny element w statystyce – przede wszystkim podczas analizy danych za pomocą histogramów. Rozkład normalny charakteryzuje się krzywą w kształcie dzwonu, symetryczną wokół średniej. Większość punktów danych skupia się wokół centralnego szczytu, a prawdopodobieństwo wystąpienia wartości bardziej oddalonych od średniej zmniejsza się równomiernie w obu kierunkach. Rozkłady odbiegające od normalnego mogą wykazywać różne cechy, takie jak skośność (asymetrię) i kurtozę, które opisują, jak rozkład różni się od normalnego pod względem koncentracji wartości wokół średniej oraz kształtu ogonów rozkładu.

Na rysunku 2.8 zilustrowano typy rozkładów w ujęciu wartości współczynnika skośności – asymetrię lewostronną, rozkład symetryczny oraz asymetrię prawostronną. Wskazano również na zależności między asymetrią rozkładu a położeniem średniej, mediany i dominanty.

Rysunek 2.8. Typy rozkładów w zależności od wartości współczynnika skośności



Legenda

Me – mediana

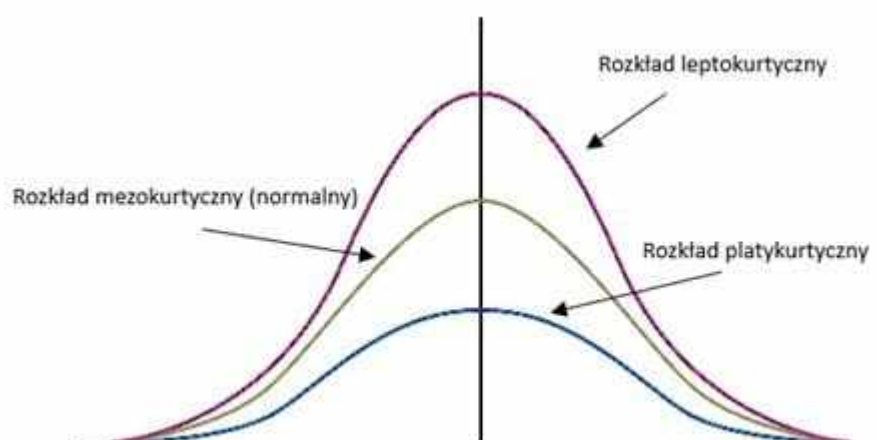
Mo – dominanta

$\bar{x}$ – średnia arytmetyczna

Źródło: opracowanie własne na podstawie: M. Ręklewski, *Statystyka opisowa*, Wydawnictwo Państwowej Uczelni Zawodowej we Włocławku, Włocławek 2020, s. 1–182

Typologia rozkładów w ujęciu wartości kurtozy została przedstawiona na rysunku 2.9. Rozróżnia się trzy zasadnicze rodzaje: rozkład leptokurtyczny, który charakteryzuje się największą intensywnością wartości skrajnych w porównaniu z rozkładem normalnym i platykurtycznym, rozkład mezokurtyczny (normalny) oraz rozkład platykurtyczny, który odznacza się mniejszą intensywnością w odniesieniu do wartości ekstremalnych.

Rysunek 2.9. Typologia rozkładów w ujęciu wartości kurtozy



Źródło: opracowanie własne na podstawie: M. Ręklewski, *Statystyka opisowa*, Wydawnictwo Państwowej Uczelni Zawodowej we Włocławku, Włocławek 2020, s. 1–182

W statystycznej kontroli procesu histogramy w połączeniu z kartami kontrolnymi stanowią kompleksowe podejście do analizy wydajności procesu. Karty kontrolne umożliwiają monitorowanie oraz kontrolowanie stabilności procesu w czasie, podczas gdy histogramy przedstawiają rozkład danych procesowych²⁰³.

Pomimo swoich zalet i szerokiego zastosowania histogramy mają ograniczenia, które mogą znacząco wpływać na analizę i interpretację danych. Właściwe zrozumienie tych ograniczeń jest kluczowe dla badaczy polegających na histogramach w reprezentacji danych. Jednym ze znaczących ograniczeń jest wrażliwość histogramów na wielkość przedziałów, co może wpływać na prezentację i interpretację rozkładu danych. Kształt histogramu może się znacząco zmieniać przy różnych szerokościach przedziałów – zbyt mała liczba przedziałów może nadmiernie upraszczać dane, maskując ważne trendy lub zachowania procesu, podczas gdy zbyt duża liczba może wprowadzać szum i zaciemniać podstawowy rozkład. Opisane ograniczenie jest szczególnie istotne w przypadku wielowymiarowych zbiorów danych, gdzie wychwytywanie wzajemnych korelacji między cechami staje się złożone, co często skutkuje niedokładnymi reprezentacjami danych²⁰⁴.

Zastosowanie histogramów jest ważnym elementem statystycznej kontroli procesu, lecz podobnie jak w przypadku kart kontrolnych ich indywidualne zastosowanie może nie być wolne od potencjalnych błędów interpretacyjnych. Konieczne jest zatem ich stosowanie równoległe z innymi narzędziami SPC. Histogramy jako samodzielne narzędzia mogą nie być wystarczająco kompleksowe, co może prowadzić do problemów z identyfikacją oraz analizą danych.

2.2.3. Diagram Pareto

Diagram Pareto jest powszechnie uznawany za kluczowe narzędzie w statystycznej kontroli procesu, ponieważ umożliwia skuteczną identyfikację i priorytetyzację problemów oraz niezgodności w analizowanych procesach. Odwołuje się do zasady Pareto, która zakłada, że niewielka liczba przyczyn odpowiada za większość skutków. W rezultacie diagram pozwala wizualizować dane w sposób podkreślający najistotniejsze czynniki wpływające na jakość i efektywność prowadzonych procesów.

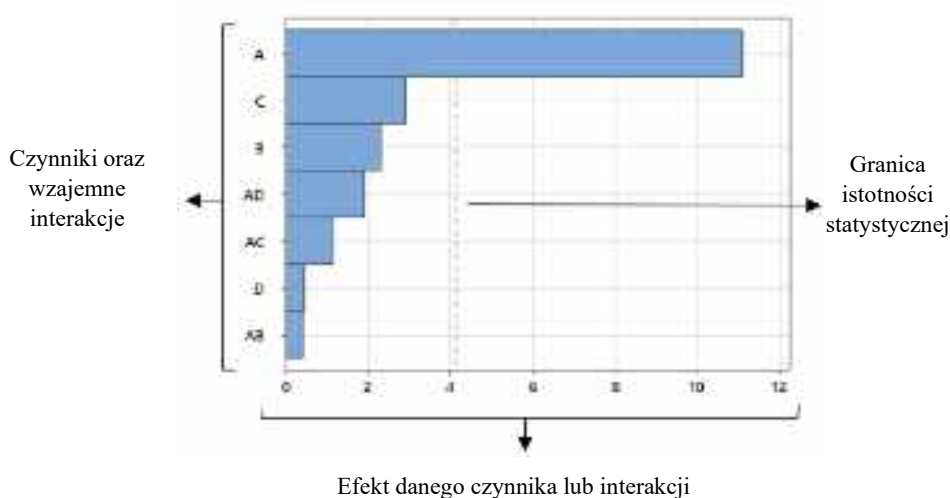
²⁰³ Tamże.

²⁰⁴ A. Deligiannakis, N. Roussopoulos, *Extended wavelets for multiple measures*, w: *Proceedings of the 2003 ACM SIGMOD international conference on Management of data*, 2003, s. 229–240.

Głównym celem wykorzystania diagramu Pareto jest ułatwienie podejmowania decyzji poprzez przedstawienie częstotliwości lub wpływu problemów, co umożliwia organizacjom skoncentrowanie działań doskonalących na najważniejszych obszarach²⁰⁵. Taka forma wizualizacji danych wspiera określenie znaczenia badanych kwestii i tym samym sprzyja podejmowaniu świadomych decyzji. Ponadto integracja diagramu Pareto z innymi narzędziami statystycznej kontroli procesu zwiększa jego skuteczność w obszarze kontroli jakości, co jest szczególnie ważne w złożonych środowiskach, gdzie wiele czynników przyczynia się do zmienności i wad.

Przykładowa struktura diagramu Pareto przedstawiona została na rysunku 2.10. Diagram odnosi się do wpływu poszczególnych czynników (A, B, C, D) oraz interakcji między nimi (AB, AC, AD) na określony parametr procesu. Ukazuje, które z nich mają istotny wpływ na proces, uwzględniając poziom istotności statystycznej, co umożliwia identyfikację kluczowych zmiennych wpływających na jakość.

Rysunek 2.10. Przykładowa konstrukcja diagramu Pareto



Źródło: opracowanie własne przy użyciu programu Minitab Statistical Software 22

Implementacja diagramu Pareto obejmuje kilka kluczowych kroków. Po pierwsze należy zebrać dane dotyczące częstotliwości lub wpływu poszczególnych problemów czy wad. Następnie dane te są odpowiednio kategoryzowane w celu zidentyfikowania

²⁰⁵ H. Kurnia, S. Setiawan, M. Hamsal, *Implementation of Statistical Process Control for Quality Control Cycle in the Various Industry in Indonesia: A Systematic Literature Review*, „Journal Operations Excellence: Journal of Applied Industrial Engineering” 2021, vol. 13, no. 2, s. 194–206.

najważniejszych kwestii. Po uporządkowaniu informacji tworzy się diagram Pareto, który przedstawia skategoryzowane rodzaje problemów lub wad w kolejności malejącej pod względem częstotliwości ich występowania²⁰⁶.

Należy jednak pamiętać, że diagram Pareto, jak każde narzędzie statystyczne, ma swoje ograniczenia. Jednym z nich jest subiektywność związana z wyborem i właściwą kategoryzacją danych. Skuteczność tego narzędzia zależy od jakości i trafności analizowanych informacji. W przypadku jeśli dane są niereprezentatywne lub kategorie zostały źle zdefiniowane, diagram może prowadzić do błędnych wniosków.

Kolejnym ograniczeniem jest fakt, że diagramy Pareto skupiają się na jednym wymiarze analizy problemu, takim jak częstotliwość występowania czy koszt, co może nie oddawać pełnej złożoności niektórych zagadnień. Na przykład diagram może wskazywać najczęstsze problemy lub wady, ale nie uwzględniać ich wagi czy wpływu na ogólną jakość. Singh i Lou zauważają, że w przypadku optymalizacji wielokryterialnej poleganie wyłącznie na analizie Pareto może prowadzić do pominięcia znaczących współzależności między różnymi elementami²⁰⁷. Dlatego konieczne jest stosowanie dodatkowych narzędzi, aby dogłębnie zrozumieć analizowane kwestie.

Warto również zwrócić uwagę na ryzyko, że diagram Pareto może stworzyć fałszywe poczucie bezpieczeństwa wśród decydentów, sugerując, że rozwiązanie najważniejszych problemów wystarczy do poprawy sytuacji w organizacji lub procesie. Jak podkreślają Korkmaz i in., statystyczna istotność czynników zidentyfikowanych na wykresie Pareto nie gwarantuje, że ich eliminacja przyniesie znaczną poprawę ogólnej wydajności procesu²⁰⁸.

Diagram Pareto, choć jest ważnym narzędziem analizy danych, ma swoje ograniczenia, ponieważ prezentuje tylko wycinek danych z określonego momentu, co może nie oddawać bieżących zmian w procesach. Rivoire i in. podkreślają znaczenie dynamicznej analizy oraz ciągłego monitorowania procesów, co stanowi kluczowy element pełnowymiarowej analizy Pareto²⁰⁹. Ograniczenie to wskazuje na potrzebę integracji analizy Pareto z monitorowaniem danych w czasie rzeczywistym oraz

²⁰⁶ P. Grzegorzewski, *Statistical tests for comparing Pareto Charts*, „Communications in Numerical Analysis” 2012, s. 1–12.

²⁰⁷ A. Singh, H.H. Lou, *Hierarchical Pareto Optimization for the Sustainable Development of Industrial Ecosystems*, „Industrial & Engineering Chemistry Research” 2006, vol. 45, no. 9, s. 3265–3279.

²⁰⁸ M. Korkmaz [i in.], *Boron removal by coagulation using Al (OH) 3 and factorial optimization of data for boron mine wastewater*, „Balikesir Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi” 2020, vol. 22, no. 2, s. 687–697.

²⁰⁹ P. Rivoire, O. Martius, P. Naveau, *A Comparison of Moderate and Extreme ERA-5 Daily Precipitation With Two Observational Data Sets*, „Earth and Space Science” 2021, vol. 8, no. 4, e2020EA001633.

zastosowaniem innych narzędzi umożliwiających dynamiczną ocenę, co pozwala na bardziej efektywną reakcję na problemy jakościowe.

Należy również zwrócić uwagę, że diagramy Pareto silnie koncentrują się na danych ilościowych, co może prowadzić do pomijania istotnych czynników jakościowych. Dotyczy to zwłaszcza wskaźników takich jak poziom zadowolenia klientów czy opinie pracowników, które, mimo kluczowego znaczenia w zarządzaniu jakością, nie zawsze są uwzględniane. W badaniach Zhou i in. zwrócono uwagę, że integracja danych jakościowych i ilościowych prowadzi do pełniejszego zrozumienia procesów oraz skuteczniejszego doskonalenia ich wydajności²¹⁰. Dane jakościowe, takie jak doświadczenia klientów, mogą dostarczać cennych informacji na temat ukrytych problemów, niewidocznych w analizach ilościowych. Wzbogacenie analizy Pareto o metody jakościowe pozwala na uzyskanie bardziej kompleksowego obrazu procesów, co przekłada się na skuteczniejsze zarządzanie jakością.

Chociaż diagram Pareto jest powszechnie stosowanym narzędziem w statystycznej kontroli procesu, jego stosowanie wiąże się z pewnymi ograniczeniami, które należy uwzględniać przy analizie danych. Diagramy te cechują się subiektywnością w doborze danych, statycznym charakterem oraz nadmiernym naciskiem na dane ilościowe. Aby maksymalizować skuteczność analizy Pareto, organizacje powinny łączyć ją z innymi narzędziami zarządzania jakością.

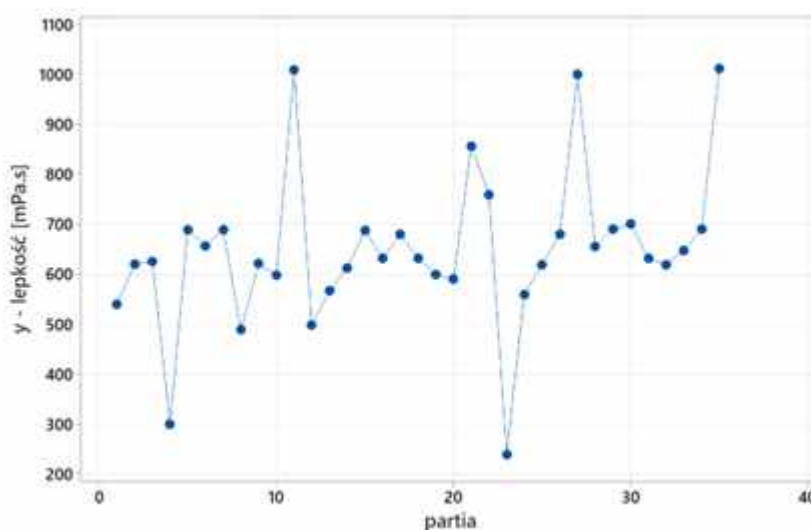
2.2.4. Wykres rozrzutu (punktowy)

Wykres rozrzutu jest narzędziem umożliwiającym wizualizację punktów danych, co pozwala na identyfikację trendów, wzorców oraz wartości odstających, wspomagając podejmowanie świadomych decyzji w zakresie analizowanego procesu (rysunek 2.11). Jego istotną rolą w statystycznej kontroli procesu jest ukazanie zależności między zmiennymi. W rezultacie dwuwymiarowa wizualizacja danych pozwala w prostszy sposób dostrzec korelacje, które mogą pozostać niewidoczne w analizach liczbowych. Przykładowo wykres rozrzutu może ujawnić, czy wzrost jednej zmiennej jest związany ze wzrostem lub spadkiem innej, co daje cenny wgląd w dynamikę procesu. Zrozumienie tych interakcji może znacząco poprawić kontrolę jakości i efektywność operacyjną²¹¹.

²¹⁰ G. Zhou [i in.], *Optimization of Ultrasound-Assisted Extraction Followed by Macroporous Resin Purification for Maximal Recovery of Functional Components and Removal of Toxic Components from Ginkgo biloba Leaves*, „BioMed Research International” 2018, vol. 2018, no. 1, 4598067.

²¹¹ H.D. Smith [i in.], *Using Visual Data Mining to Enhance the Simple Tools in Statistical Process Control: A Case Study*, „Quality and Reliability Engineering International” 2014, vol. 30, no. 6, s. 905–917.

Rysunek 2.11. Przykładowa struktura wykresu rozrzutu



Źródło: opracowanie własne przy użyciu programu Minitab Statistical Software 22

Wykresy rozrzutu są również przydatne w identyfikacji zakłóceń w procesie. Służą one do monitorowania odchyleń od oczekiwanych wartości, co umożliwia wykrycie, czy proces jest pod kontrolą, czy też wymaga dalszych analiz w celu identyfikacji przyczyn niezgodności²¹². W przypadku gdy punkty danych wykraczają poza ustalone limity kontrolne lub wykazują nielosowy rozkład, sygnalizuje to potencjalne problemy wymagające dalszych badań.

Oprócz funkcji monitorowania wykresy rozrzutu mogą być również wykorzystywane do analizy zdolności procesu. Analizując rozkład punktów danych, można ocenić, czy proces jest w stanie wytwarzać produkty spełniające przyjęte standardy jakości. Jest to kluczowy element strategii ciągłego doskonalenia, które opierają się na narzędziach statystycznych, w tym na wykresach rozrzutu, w celu zmniejszenia zmienności procesów i poprawy ich wydajności²¹³.

Integracja zaawansowanych narzędzi analitycznych, takich jak sieci neuronowe, z analizą wykresów rozrzutu dodatkowo zwiększa ich użyteczność w statystycznej kontroli procesu. Sieci neuronowe, będące zaawansowanym narzędziem obliczeniowym, mogą wspierać analizę danych, przewidując zachowanie procesów na podstawie dotychczasowych wyników. Jak wykazali Addeh i in., optymalizacja tych narzędzi w połączeniu z analizą wykresów rozrzutu może prowadzić do dokładniejszych prognoz

²¹² Y.E. Shao, *Recognition of Process Disturbances for an SPC/EPC Stochastic System Using Support Vector Machine and Artificial Neural Network Approaches*, „Abstract and Applied Analysis” 2014, 519705.

²¹³ A. Opaleye [i in.], *Quality characterisation and capability assessment of a tobacco company*, „American Journal of Theoretical and Applied Statistics” 2020, vol. 9, no. 4, s. 127–135.

wyników procesów²¹⁴. Wzajemna integracja nowoczesnych technologii ukazuje dynamiczny rozwój SPC i zarządzania jakością.

Poważnym ograniczeniem wykresów rozrzutu jest ich niezdolność do skutecznego reprezentowania relacji między więcej niż dwiema zmiennymi podczas analizy. Wykresy punktowe przedstawiają wyłącznie relacje dwuwymiarowe, co ogranicza ich użyteczność w przypadku złożonych systemów, w których zachodzą interakcje między kilkoma zmiennymi²¹⁵. Należy podkreślić, że to ograniczenie może prowadzić do nadmiernego uproszczenia danych, co może skutkować błędną interpretacją, gdyż niektóre oddziaływania między czynnikami procesu mogą zostać przeoczone.

Kolejnym ograniczeniem w ujęciu stosowania wykresów rozrzutu jest fakt, że tradycyjne wykresy punktowe mogą zaciemniać wartości odstające i utrudniać rozróżnienie rozkładów danych z powodu nakładających się punktów. To komplikuje analizę relacji między nimi²¹⁶. Opisane ograniczenie jest szczególnie niebezpieczne w obrębie statystycznej kontroli procesu, gdzie duże zbiory danych są powszechne, co może znacząco wpływać na identyfikację trendów lub anomalii wskazujących na problem z procesem.

Pomimo swoich ograniczeń wykresy rozrzutu stanowią ważne narzędzie w obszarze statystycznej kontroli procesu, umożliwiając wizualną reprezentację danych, co znacząco wpływa na ich analizę oraz interpretację. Ich zdolność do ujawniania związków między zmiennymi, identyfikowania zakłóceń, oceny zdolności procesu i dostosowywania się do różnych branż podkreśla ich znaczenie w zarządzaniu jakością. W miarę jak organizacje nadal podejmują decyzje na podstawie danych, rola wykresów rozrzutu w SPC, w połączeniu z innymi narzędziami, bez wątpienia wzrośnie.

2.2.5. Diagram przyczynowo-skutkowy

Diagram Ishikawy, określany również jako diagram przyczynowo-skutkowy, stanowi narzędzie umożliwiające analizę problemów w obszarze zarządzania jakością. Opracowany przez Kaoru Ishikawę w latach 60. XX wieku służy jako wizualna reprezentacja kategoryzująca potencjalne przyczyny określonego problemu, co ułatwia

²¹⁴ J. Addeh [i in.], *Statistical process control using optimized neural networks: A case study*, „ISA transactions” 2014, vol. 53, no. 5, s. 1489–1499.

²¹⁵ G. De León, P. Grima, X. Tort-Martorell, *Selecting control factor values in a robust design using a scatter plot*, „Quality and Reliability Engineering International” 2011, vol. 27, no. 4, s. 489–497.

²¹⁶ A. Mayorga, M. Gleicher, *Splatterplots: Overcoming Overdraw in Scatter Plots*, „IEEE transactions on visualization and computer graphics” 2013, vol. 19, no. 9, s. 1526–1538.

identyfikację przyczyn źródłowych. Jego zastosowanie zostało udokumentowane w wielu dziedzinach, w tym w produkcji, opiece zdrowotnej i usługach, wykazując wszechstronność i skuteczność w inicjatywach na rzecz poprawy jakości.

Funkcją diagramu Ishikawy jest analiza przyczyn źródłowych – jako kluczowy element w identyfikacji podstawowych przyczyn problemów lub wad (rysunek 2.12). Taka analiza jest niezbędna do wypracowania skutecznych rozwiązań zapobiegających występowaniu niezgodności, zamiast jedynie reaktywnego działania w celu doraźnego usunięcia problemów dopiero po ich pojawieniu się. Diagram dzieli potencjalne przyczyny na kategorie, które określane są jako rybie ości, odchodzące od linii centralnej – kręgosłupa reprezentującego problem. To ustrukturyzowane podejście pozwala zespołom na wizualizację relacji między różnymi czynnikami wpływającymi na określony efekt między innymi podczas sesji burzy mózgów, ułatwiając identyfikację najważniejszych przyczyn wymagających podjęcia działań²¹⁷.

W kontekście produkcji diagram Ishikawy jest uznawany za jedno z siedmiu podstawowych narzędzi kontroli jakości. Jest szczególnie przydatny w identyfikacji atrybutów jakości, a także ważnych parametrów procesu, które mają wpływ na ostateczną jakość produktu. Jego skuteczność polega na zdolności do wspierania współpracy i komunikacji między członkami zespołu podczas sesji rozwiązywania problemów. Poprzez wizualne mapowanie potencjalnych przyczyn zespoły mogą angażować się w produktywną dyskusję prowadzącą do głębszego zrozumienia omawianych kwestii. Takie podejście nie tylko poprawia jakość analizy, ale także promuje kulturę ciągłego doskonalenia w organizacjach²¹⁸. Ponadto prostota i łatwość użycia diagramu sprawiają, że jest on przystępnym narzędziem dla praktyków na wszystkich poziomach organizacji. Może być wykorzystywany na różnych etapach procesu rozwiązywania problemów – od wstępnych sesji burzy mózgów po bardziej szczegółowe analizy zidentyfikowanych przyczyn. Jego elastyczność pozwala organizacjom dostosować diagram Ishikawy do ich konkretnych potrzeb, czyniąc go cennym zasobem w inicjatywach zarządzania jakością²¹⁹.

²¹⁷ C. de Barros [i in.], *Quality by Design Approach for the Development of Liposome Carrying Ghrelin for Intranasal Administration*, „Pharmaceutics” 2021, vol. 13, no. 5, 686.

²¹⁸ I. Santos [i in.], *Fuzzy sequential model for strategic planning of small and medium scale industries*, „TELKOMNIKA” 2019, vol. 17, no. 3, s. 1310–1316.

²¹⁹ B. Pal [i in.], *Retrospective study on performance of constancy check device in Linac beam monitoring using Statistical Process Control*, „Reports of Practical Oncology and Radiotherapy” 2020, vol. 25, no. 1, s. 91–99.

Rozróżnia się trzy zasadnicze układy diagramów Ishikawy, z których każdy jest dostosowany do określonych zastosowań: układ przedmiotowy, układ technologiczny oraz układ czynników uczestniczących.

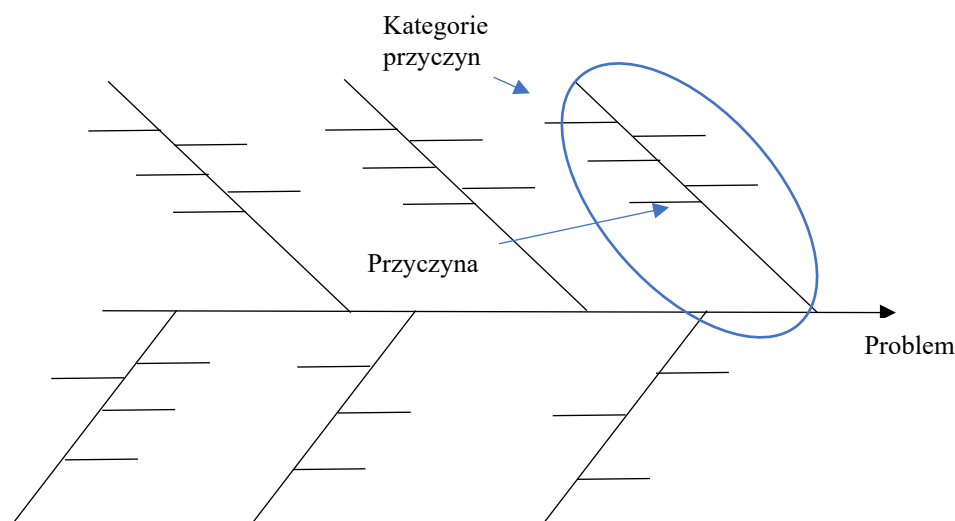
Pierwszy z nich, układ przedmiotowy, stosowany jest, gdy analizie poddany zostaje skutek nieprawidłowej jakości w ujęciu technicznym. Zwiększa on przejrzystość analizy poprzez właściwe dopasowanie przyczyn do konkretnych kategorii.

Kolejnym typem jest układ technologiczny, koncentrujący się na aspektach technologicznych związanych z problemem. Pozwala na kategoryzację przyczyn na podstawie komponentów technologicznych, takich jak maszyny czy procesy. Na przykład w produkcji układ technologiczny może zawierać takie kategorie jak maszyny, materiały czy pomiary, co jest niezbędne do identyfikacji wad powstałych w procesach produkcyjnych. Umożliwia to zespołom wskazanie awarii przyczyniających się do problemów z jakością, co podkreślono w badaniach wykorzystujących diagram Ishikawy do analizy wad produkcyjnych²²⁰.

Ostatni z układów to układ czynników uczestniczących, który jest najczęściej wykorzystywany w praktyce ze względu na swoją uniwersalność. Zakres kategorii przyczyn dla tego układu obejmuje model 5M + E: człowiek (*man*), maszyna (*machine*), metoda (*method*), materiał (*material*), pomiary (*measurement*) oraz otoczenie (*environment*). Ten szeroki zakres sprawia, że diagram Ishikawy jest narzędziem powszechnie stosowanym, znajdującym zastosowanie w różnych branżach.

²²⁰ C. de Barros [i in.], *Quality by Design Approach...*, s. 686.

Rysunek 2.12. Struktura diagramu Ishikawy



Źródło: opracowanie własne na podstawie: K. Kowalik, *Diagram Ishikawy w teorii i praktyce zarządzania jakością*, „Archiwum Wiedzy Inżynierskiej” 2018, t. 3, s. 15–17

Pomimo swojej użyteczności diagramy przyczynowo-skutkowe mają pewne ograniczenia, których zrozumienie jest kluczowe dla ich właściwego zastosowania. Jednym z głównych ograniczeń jest tendencja do nadmiernego upraszczania złożonych problemów. Chociaż celem diagramu Ishikawy jest kategoryzacja poszczególnych przyczyn w określone obszary, istnieje ryzyko pominięcia złożoności niektórych elementów. Muinga i in. wskazują, że takie diagramy mogą prowadzić do uproszczenia analizy, co zaciemnia prawdziwą naturę badanego problemu²²¹. Może to również skutkować pominięciem kluczowych czynników w analizowanym obszarze.

Kolejne ograniczenie wiąże się z subiektywnością danych wejściowych. Subiektywność wpływa bezpośrednio na identyfikację i kategoryzację przyczyn, oddziałując na ostateczny wynik analizy²²².

Dodatkowo grupowe sesje burzy mózgów służące przygotowaniu diagramu mogą prowadzić do sytuacji, w których pomysły mniej aktywnych uczestników pozostają niezauważone. Ogranicza to różnorodność wkładu, prowadząc do utraty cennych spostrzeżeń.

Dynamiczny rozwój wielu branż sprawia, że szybka ewolucja problemów jest powszechnym zjawiskiem. Diagramy Ishikawy, choć skuteczne w identyfikacji

²²¹ N. Muinga [i in.], *Designing paper-based records to improve the quality of nursing documentation in hospitals: A scoping review*, „Journal of Clinical Nursing” 2021, vol. 30, no. 1–2, s. 56–71.

²²² K. Adib, M. Mazouzi, S. Elyoussoufi, *Investigation of annual trucks fatal accidents in El Hajeb province of Morocco using TRIZ-Ishikawa diagram*, „Heliyon” 2024, vol. 10, no. 4, e26295.

bieżących przyczyn, często nie uwzględniają dynamiki tych zmian, co skutkuje szybką dezaktualizacją przeprowadzonych analiz. Jest to szczególnie ważne, gdy przyczyny źródłowe problemów mogą zmieniać się w krótkim czasie²²³.

Kolejną limitację stanowi ograniczona zdolność do wieloaspektowej analizy złożonych problemów. Choć narzędzie to jest użyteczne, może nie uchwycić wielu współzależności, szczególnie w kontekście bardziej skomplikowanych systemów. W takich przypadkach istnieje ryzyko, że analiza będzie niekompletna. Diagram Ishikawy ma tendencję do pomijania wzajemnych zależności między przyczynami, prowadząc do powierzchownych analiz i trudności w opracowaniu skutecznych rozwiązań. Dodatkowo mogą pojawić się bariery z dostarczeniem jednoznacznych wniosków, zwłaszcza gdy identyfikacja pierwotnej przyczyny jest niemożliwa. Podkreśla to konieczność uzupełniania diagramów innymi narzędziami analitycznymi.

Skuteczność diagramu Ishikawy zależy w dużej mierze od jakości danych wejściowych. Jeśli analiza opiera się na niezwyfikowanych informacjach, jej wyniki mogą być błędne. Dlatego kluczowe jest precyzyjne gromadzenie danych oraz ich weryfikacja przed rozpoczęciem analizy. Niedokładne dane mogą prowadzić do niewłaściwych wniosków, obniżając jego przydatność.

Podsumowując, pomimo swoich zalet w kategoryzowaniu przyczyn problemów diagram Ishikawy charakteryzują znaczące ograniczenia. Należy uwzględnić niebezpieczeństwo nadmiernego uproszczenia złożonych zagadnień, brak uwzględnienia wielopoziomowych oddziaływań oraz dynamiki zmian w czasie. Ponadto jakość danych wejściowych odgrywa istotną rolę w analizie przyczyn źródłowych. Świadomość tych ograniczeń wymusza integrację diagramu Ishikawy z innymi narzędziami analitycznymi, co pozwala na dokładniejsze i bardziej efektywne poszukiwanie przyczyn problemów.

2.2.6. Wskaźniki zdolności procesu

Wskaźniki zdolności procesu stanowią kluczowe narzędzia w zarządzaniu jakością produkcji i w procesach przemysłowych. Określają, w jakim stopniu proces produkcyjny jest zdolny wytwarzać produkty zgodne z ustalonymi specyfikacjami i tolerancjami, co jest fundamentalne dla utrzymania wysokiej jakości wyrobów i usług. Pozwalają również na ocenę wydajności procesu oraz oszacowanie prawdopodobieństwa, że wytworzone

²²³ Tamże.

produkty spełnią wymagania²²⁴. W szerszym ujęciu wskaźniki te przedstawiają ilościowy związek między rzeczywistą wydajnością procesu a wymaganiami specyfikacji produktu²²⁵. Aby zrozumieć zdolność procesu, kluczowe jest uwzględnienie trzech podstawowych parametrów: dopuszczalnych limitów specyfikacji, średniej procesu oraz jego zmienności. Limity specyfikacji definiują akceptowalny zakres zmienności cech produktu, podczas gdy średnia procesu wskazuje na przeciętny poziom tych cech. Zmienność procesu, często mierzona za pomocą odchylenia standardowego, pokazuje, w jakim stopniu wyniki odbiegają od średniej. Proces uznaje się za odpowiedni, jeśli większość jego wyników mieści się w granicach specyfikacji, co ocenia się przy użyciu różnych wskaźników zdolności procesu.

Wskaźnik zdolności potencjalnej (C_p) mierzy zdolność procesu do wytwarzania produktów mieszczących się w granicach tolerancji, nie biorąc pod uwagę położenia średniej procesu względem tych granic. Natomiast wskaźnik zdolności rzeczywistej (C_{pk}) uwzględnia położenie średniej procesu, co pozwala na dokładniejszą ocenę funkcjonowania procesu w praktyce.

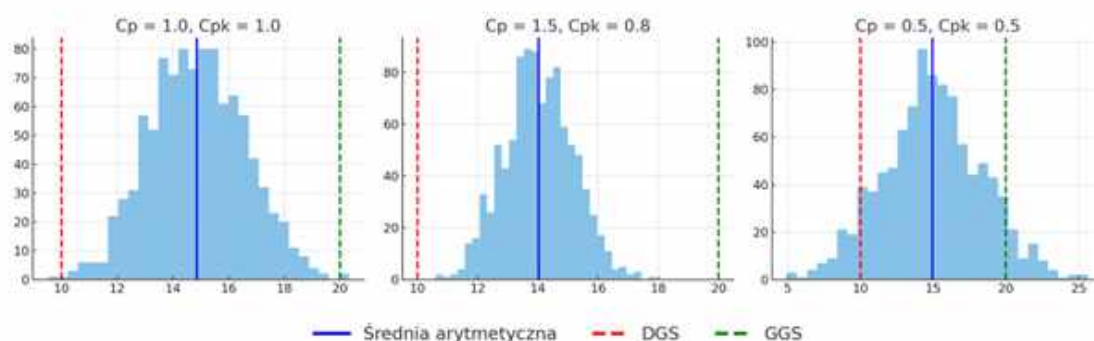
Podobnie do C_p wskaźnik zdolności potencjalnej długoterminowej (P_p) mierzy zdolność procesu do produkcji w granicach specyfikacji, lecz odnosi się do zmienności długoterminowej. Wskaźnik zdolności rzeczywistej długoterminowej (P_{pk}) ocenia zmienność procesu w długim okresie, uwzględniając zarówno rozrzut, jak i przesunięcie średniej. P_{pk} , analogicznie do C_{pk} , bierze pod uwagę rozprzestrzenienie, a także centrowanie procesu, lecz w kontekście długoterminowej zmienności, umożliwiając przy tym pełniejszą ocenę rzeczywistej wydajności procesu.

Różnice między wskaźnikami C_p i C_{pk} zostały przedstawione na rysunku 2.13, na którym pokazano ich wzajemne relacje. Dolna granica specyfikacji oznaczona jako DGS – przerywana krzywa w kolorze czerwonym, górna granica specyfikacji GGS – w kolorze zielonym.

²²⁴ L. Daniels [i in.], *Using Confidence Intervals to Compare Process Capability Indices*, „Quality Engineering” 2024, vol. 17, s. 23–32.

²²⁵ S. Kumar, S. Dey, M. Saha, *Comparison between two generalized process capability indices for Burr XII distribution using bootstrap confidence intervals*, „Life Cycle Reliability and Safety Engineering” 2019, vol. 8, s. 347–355.

Rysunek 2.13. Schemat obrazujący różnice pomiędzy wskaźnikiem C_p i C_{pk} w ujęciu różnych scenariuszy



Źródło: opracowanie własne na podstawie: M. Szerszunowicz, *Analiza zdolności procesu o zależnych charakterystykach*, „Studia Ekonomiczne” 2013, vol. 152, s. 153–161, przy użyciu oprogramowania Microsoft Word

Pierwszy z przedstawionych na rysunku 2.13 scenariuszy dla C_p i C_{pk} równego 1 wskazuje na proces, który charakteryzuje się zdolnością do spełniania wymagań specyfikacji, a jego rozkład jest wycentrowany pomiędzy dolną (DGS) i górną granicą specyfikacji (GGS). Wartości C_p i C_{pk} równe 1 oznaczają, że proces znajduje się na progu akceptowalności – bez dużego marginesu bezpieczeństwa w ujęciu ewentualnych wahań. Z perspektywy zarządzania jakością taki proces wymaga ciągłego monitorowania, aby zachować stabilność i zapobiec przekroczeniu wyznaczonych granic tolerancji.

W przypadku gdy $C_p > 1$ i $C_{pk} < 1$, mamy do czynienia z procesem, który teoretycznie posiada wystarczającą zdolność do spełniania specyfikacji (wysoka wartość C_p), jednak jego rzeczywista wydajność jest ograniczona z powodu przesunięcia średniej z dala od środka przedziału specyfikacji. Niska wartość C_{pk} wskazuje, że mimo odpowiedniej zmienności proces nie jest wycentrowany względem dolnej i górnej granicy specyfikacji. Taka sytuacja sugeruje konieczność korekty w celu zredukowania odchył od wartości docelowej i przywrócenia jego stabilności, co pozwoli w pełni wykorzystać jego potencjał.

Trzeci przypadek zakłada, że zarówno C_p , jak i C_{pk} wynoszą 0,5, co oznacza, że proces nie spełnia wymagań specyfikacyjnych. Wartości C_p i C_{pk} na poziomie 0,5 zwracają uwagę na znaczną zmienność oraz przesunięcie średniej z dala od wartości docelowej. Taki proces nie jest w stanie utrzymać produkcji w granicach tolerancji, co oznacza, że wymaga on kompleksowej optymalizacji. Konieczne są zmniejszenie

zmienności i poprawa wyśrodkowania, aby zwiększyć jego zdolność do spełniania wyznaczonych norm jakościowych.

Tabela 2.2 przedstawia zależności między wskaźnikiem zdolności procesu Cpk, liczbą odchyłeń standardowych a liczbą wadliwych części na milion (PPM). Warto zauważyć, że wraz ze wzrostem wartości Cpk rośnie liczba odchyłeń standardowych, podczas gdy liczba wadliwych części na milion systematycznie maleje. Taka zależność świadczy o poprawie jakości procesu.

Tabela 2.2. Zależność między wskaźnikiem zdolności procesu Cpk, liczbą odchyłeń standardowych a liczbą wadliwych części na milion

Cpk	Wartość σ	PPM
0,1	0,3	764177
0,2	0,6	548506
0,3	0,9	368120
0,4	1,2	230139
0,5	1,5	133614
0,6	1,8	71861
0,7	2,1	35729
0,8	2,4	16395
0,9	2,7	6934
1,0	3,0	2700
1,1	3,3	967
1,2	3,6	318
1,3	3,9	96
1,4	4,2	27
1,5	4,5	7
1,6	4,8	2
1,7	5,1	0,34
1,8	5,4	0,067
1,9	5,7	0,012
2,0	6,0	0,002

Źródło: opracowanie własne na podstawie: *Cp Cpk Pp Ppk and % out of tolerance*, Develve.net, <https://develve.net/Cp%20Cpk%20%2525%20out%20of%20tolerance.html>, [dostęp: 1 kwietnia 2025]

Na poniższych równaniach przedstawiono, w jaki sposób wyliczane są wartości poszczególnych wskaźników zdolności procesu.

$$C_p = \frac{(GGS - DGS)}{6\sigma} \quad (14)$$

$$C_{pk} = \min\left(\frac{\bar{x} - DGS}{3\sigma}, \frac{GGS - \bar{x}}{3\sigma}\right) \quad (15)$$

$$P_p = \frac{(GGS - DGS)}{6s} \quad (16)$$

$$P_{pk} = \min\left(\frac{\bar{x} - DGS}{3s}, \frac{GGS - \bar{x}}{3s}\right) \quad (17)$$

$$\sigma = \frac{\overline{MR}}{d_2} \quad (18)$$

$$\sigma = \frac{\bar{R}}{d_2} \quad (19)$$

$$s = \sqrt{\frac{\sum(x_n - \bar{x})^2}{n - 1}} \quad (20)$$

$$s = \sqrt{\frac{\sum(x_n - \bar{x})^2}{n}} \quad (21)$$

C_p – wskaźnik zdolności potencjalnej (krótkoterminowej);

C_{pk} – wskaźnik zdolności rzeczywistej (krótkoterminowej);

P_p – wskaźnik zdolności potencjalnej (długoterminowej);

P_{pk} – wskaźnik zdolności rzeczywistej (długoterminowej);

GGS – górna granica specyfikacji;

DGS – dolna granica specyfikacji;

σ – odchylenie standardowe obliczane na podstawie wartości indywidualnych (18). Wzór (19) odnosi się do odchylenia standardowego obliczanego dla podgrup;

$\bar{x}$ – średnia arytmetyczna obliczana na podstawie wzoru (8);

$\overline{MR}$ – średnia z ruchomego rozstępu obliczana zgodnie ze wzorem (9);

$\bar{R}$ – średni rozstęp obliczany na podstawie wzoru (4);

d_2 – stała zależna od liczby obserwacji w próbie (dla $n = 2$, wynosi 1,128);

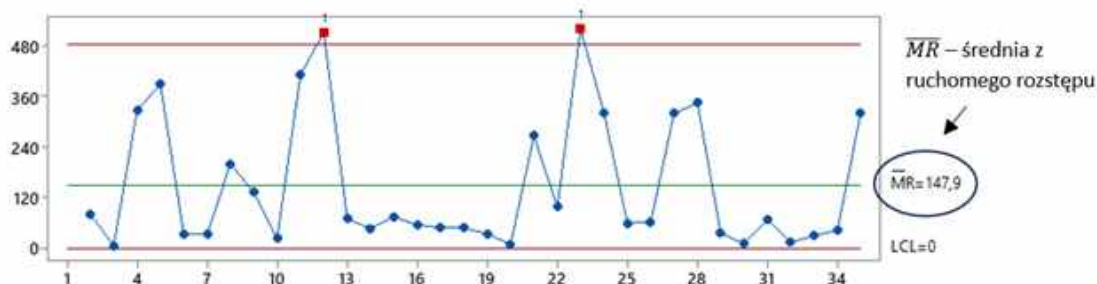
s – wzór (20) dotyczy odchylenia standardowego dla próby. Wzór (21) odnosi się do populacji;

x_n – pojedyncza wartość w próbie;

n – liczba obserwacji w próbie.

Wyznaczenie średniej wartości ruchomego rozstępu $\overline{MR}$ jest też możliwe poprzez odczytanie wartości bezpośrednio z karty kontrolnej ruchomego rozstępu MR. Na rysunku 2.14 przedstawiono przykładową kartę kontrolną MR.

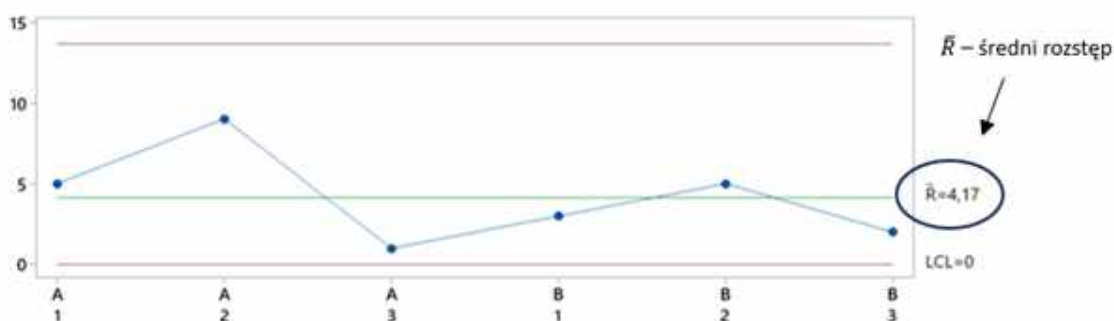
Rysunek 2.14. Przykładowa karta kontrolna ruchomego rozstępu MR – wyznaczenie wartości ruchomego rozstępu



Źródło: opracowanie własne przy użyciu programu Minitab Statistical Software 22

Podobnie jak w przypadku średniego ruchomego rozstępu ($\overline{MR}$) możliwe jest wyznaczenie wartości średniego rozstępu ($\bar{R}$) przy użyciu karty kontrolnej rozstępu R. Przykład takiej karty przedstawiono na rysunku 2.15.

Rysunek 2.15. Przykładowa karta kontrolna rozstępu R – wyznaczenie wartości rozstępu



Źródło: opracowanie własne przy użyciu programu Minitab Statistical Software 22

Jedną z zalet wykorzystania wskaźników zdolności procesu jest ich zdolność do zapewnienia liczbowej miary wydajności procesu, co znacząco upraszcza przekazywanie informacji. To szczególnie istotne w organizacjach, w których wiele procesów realizowanych jest równolegle, co sprawia, że możliwe staje się szybkie porównanie oraz ocena ich zdolności²²⁶.

Dodatkowo wykorzystanie wskaźników zdolności procesu pomaga w identyfikacji obszarów wymagających poprawy, co sprawia, że organizacje wdrażają ukierunkowane

²²⁶ M.T. Chao, D.K. Lin, *Another Look at the Process Capability Index*, „Quality and Reliability Engineering International” 2006, vol. 22, no. 2, s. 153–163.

interwencje, mające na celu zwiększenie stabilności procesu i równoległe zmniejszenie jego zmienności²²⁷.

Analiza zdolności procesu nie ogranicza się do obszaru produkcji. Ma zastosowanie w różnych branżach, w tym w laboratoriach klinicznych, farmacji czy sektorze usług. Przykładowo w laboratoriach klinicznych wskaźniki zdolności procesów są wykorzystywane do oceny procesów kontroli jakości, zapewniając, że wyniki testów mieszczą się w dopuszczalnych granicach, utrzymując w ten sposób wiarygodność testów diagnostycznych²²⁸. W przemyśle farmaceutycznym badania zdolności procesu mają istotne znaczenie w celu zapewnienia, że procesy produkcji leków spełniają rygorystyczne normy, wpływające bezpośrednio na bezpieczeństwo pacjentów i skuteczność leczenia²²⁹.

W ostatnich latach postępy w analityce danych i uczeniu maszynowym jeszcze bardziej zwiększyły możliwości analizy zdolności procesów. Technologie te umożliwiają organizacjom analizowanie dużych zbiorów danych w celu identyfikacji trendów, przewidywania wydajności procesów i optymalizacji operacji w czasie rzeczywistym. Na przykład analityka predykcyjna może być wykorzystywana do prognozowania potencjalnych odchyleń od specyfikacji, umożliwiając proaktywne dostosowania w celu utrzymania zdolności procesu²³⁰.

Pomimo szerokiego zastosowania w wielu branżach wskaźniki zdolności procesu mają pewne ograniczenia, które mogą bezpośrednio wpływać na ich skuteczność w monitorowaniu i zarządzaniu jakością²³¹.

Aby wskaźniki zdolności procesu funkcjonowały poprawnie, konieczne jest, żeby dane w analizowanym procesie miały rozkład normalny. Należy jednak podkreślić, że wiele procesów nie spełnia tego warunku, co prowadzi do niedokładnej oraz błędnej oceny ich zdolności. Problem nasila się w sytuacjach, w których dane są skorelowane,

²²⁷ X. Xin-jia, Y. Feng, *Process quality indices: new metrics for process quality capability with zero-loss baseline*, „Total Quality Management & Business Excellence” 2021, vol. 33, no. 9–10, s. 975–993.

²²⁸ T. Sanghangthum [i in.], *A method of setting limits for the purpose of quality assurance*, „Physics in Medicine and Biology” 2013, vol. 58, no. 19, s. 7025–7037.

²²⁹ G.V.S.S. Sharma, P.S. Rao, *A DMAIC approach for process capability improvement an engine crankshaft manufacturing process*, „Journal of Industrial Engineering International” 2014, vol. 10, s. 1–11.

²³⁰ T. Pheng [i in.], *Prediction of Process Quality Performance Using Statistical Analysis and Long Short-Term Memory*, „Applied Sciences” 2022, vol. 12, no. 2, 735.

²³¹ A. Kwilinski, M. Kardas, *Enhancing process stability and quality management: A comprehensive analysis of process capability indices*, „Virtual Economics” 2024, vol. 6, no. 4, s. 73–92.

a wskaźniki zdolności procesu nie uwzględniają zależności między obserwacjami, wpływając negatywnie na wiarygodność wyników analiz²³².

Ponadto tradycyjne wskaźniki zdolności procesu nie są w stanie właściwie uwzględnić złożonych procesów, wymagających podejścia wielowymiarowego. Rzeczywiste procesy często wymagają jednoczesnej oceny wielu cech jakościowych. Konwencjonalne wskaźniki zostały zaprojektowane dla scenariuszy jednowymiarowych, co ogranicza ich zastosowanie w bardziej skomplikowanych warunkach²³³. Brak holistycznego podejścia prowadzi do niepełnego zrozumienia analizy, nie uwzględniając interakcji między poszczególnymi cechami.

Kolejnym znaczącym ograniczeniem jest fakt, że wskaźniki zdolności procesu są mało przydatne w aspekcie produkcji krótkoterminowej. Oparcie analizy na ograniczonej próbie niesie ryzyko, że wskaźniki nie dostarczą wystarczających informacji do wiarygodnego oszacowania zdolności procesu. Może to skutkować zbyt optymistycznymi ocenami, podczas gdy w rzeczywistości proces może nie być w stanie konsekwentnie spełniać wymagań specyfikacyjnych.

Dodatkowo właściwa interpretacja wskaźników może stanowić wyzwanie. Chociaż dostarczają one wartości liczbowe wskazujące na zdolność procesu, nie identyfikują one jednak przyczyn źródłowych wpływających na jego wydajność. Brak możliwości głębszej interpretacji utrudnia podejmowanie skutecznych decyzji i doskonalenia procesów, ponieważ niejasny jest charakter czynników przyczyniających się do obserwowanych poziomów zdolności²³⁴.

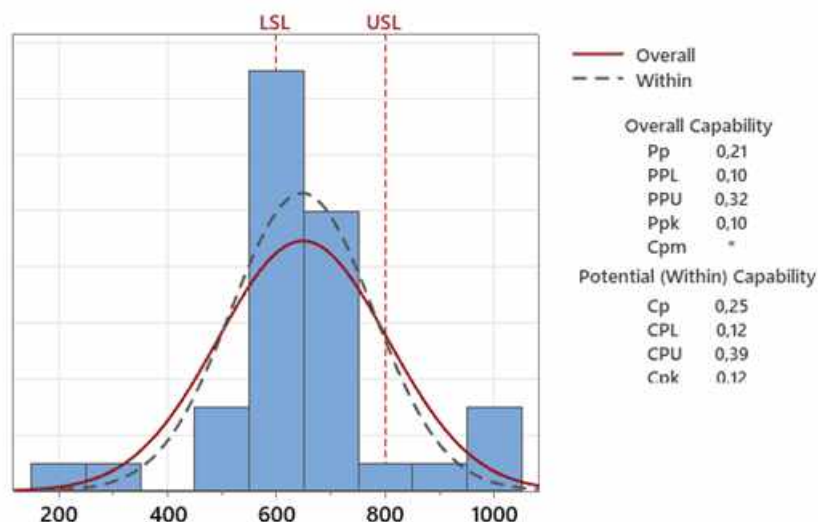
Ponadto analiza wartości wskaźników zdolności procesu nie dostarcza informacji o rodzaju zmienności występującej w badanym procesie, co ma istotne znaczenie w kwestii wnioskowania oraz podejmowania działań naprawczych, które mogą finalnie doprowadzić do zwiększenia poziomu zmienności, zamiast jej redukcji. Na rysunku 2.16 przedstawiono przykład rozkładu danych w procesie wraz z wyliczonymi za pomocą programu Minitab wartościami wskaźników Cp, Cpk, Pp i Ppk.

²³² S.A. Mingoti, F.L.P.D. Oliveira, *On Capability Indices for Multivariate Autocorrelated Processes*, „Brazilian Journal of Operations & Production Management” 2011, vol. 8, no. 1, s. 133–152.

²³³ K. Chen, W.L. Pearn, P.C. Lin, *Capability measures for processes with multiple characteristics*, „Quality and Reliability Engineering International” 2003, vol. 19, no. 2, s. 101–110.

²³⁴ M.Z. Anis, *Basic process capability indices: an expository review*, „International Statistical Review” 2008, vol. 76, no. 3, s. 347–367.

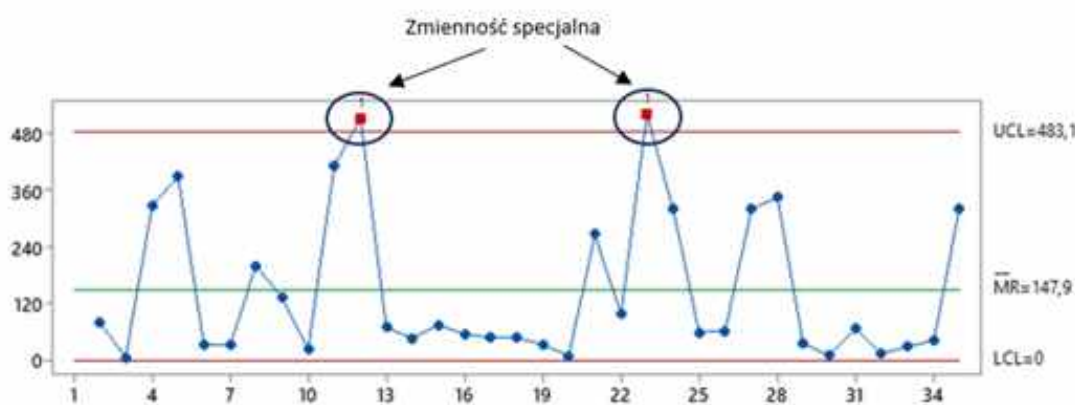
Rysunek 2.16. Dystrybucja danych procesowych wraz z obliczonymi wartościami wskaźników Cp, Cpk, Pp i Ppk



Źródło: opracowanie własne przy użyciu programu Minitab Statistical Software 22

Zaobserwowano, że uzyskane wartości wskaźników nie pozwalają na określenie rodzaju zmienności występującej w procesie. Histogram ukazuje jednak obserwacje znacząco przekraczające górną granicę specyfikacji (USL) oraz wartości poniżej dolnej granicy specyfikacji (LCL), odbiegające istotnie od przewidzianego przedziału. Mimo to nie można jednoznacznie stwierdzić, czy taki rozkład danych wskazuje na obecność zmienności specjalnej w procesie. Do właściwej oceny rodzaju zmienności niezbędne jest zastosowanie kart kontrolnych. Jako że analizowany przykład dotyczy wartości indywidualnych, opartych na czasie, w celu oceny występującej zmienności należy użyć karty kontrolnej ruchomego rozstępu. Na rysunku 2.17 przedstawiono przykład karty MR, która wskazuje na obecność zmienności specjalnej w badanym procesie. Warto zaznaczyć, że dotyczy ona tego samego procesu, który został przedstawiony na rysunku 2.16 w kontekście wskaźników zdolności procesu oraz dystrybucji danych na histogramie.

Rysunek 2.17. Zmienność specjalna na karcie kontrolnej ruchomego rozstępu MR

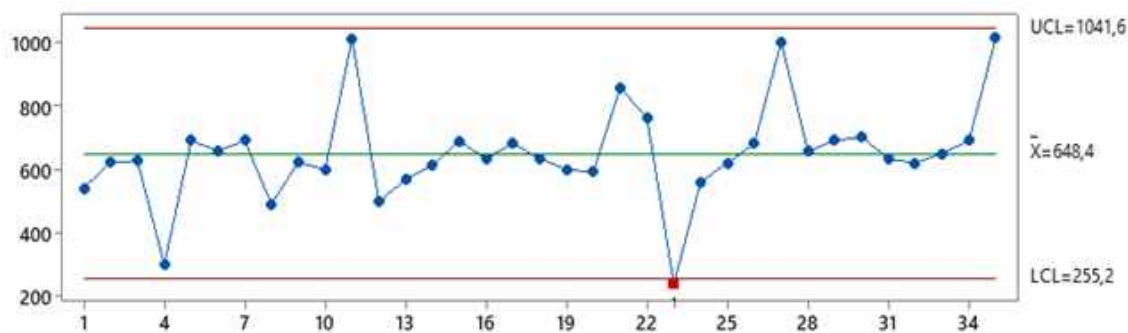


Źródło: opracowanie własne przy użyciu programu Minitab Statistical Software 22

Opisany przykład wskazuje na konieczność uzupełnienia analizy procesu o dodatkowe narzędzia poza wskaźnikami zdolności procesu. Brak zastosowania uzupełniających metod statystycznej kontroli może bowiem sprawić, że działania oparte wyłącznie na wartościach uzyskanych wskaźników będą prowadziły do niewłaściwych decyzji, a w konsekwencji do rozregulowania procesu.

Ograniczeniem w stosowaniu wskaźników zdolności procesu jest również fakt, że są one kalkulowane na podstawie dolnych i górnych granic specyfikacji, które nie odzwierciedlają naturalnej zmienności. Powoduje to dysonans pomiędzy rzeczywistą zmiennością procesu a przyjętymi granicami tolerancji. Aby prawidłowo zdefiniować rzeczywisty rozkład wariancji dla danych zbieranych pojedynczo, konieczne jest przygotowanie karty wartości indywidualnych. Przykład zaprezentowany na rysunku 2.18 przedstawia kartę (I), która na podstawie wartości procesowych wyznacza rzeczywistą zmienność procesu.

Rysunek 2.18. Karta kontrolna wartości indywidualnych – rzeczywista zmienność procesu



Źródło: opracowanie własne przy użyciu programu Minitab Statistical Software 22

Dolna oraz górna granica specyfikacji w analizowanym procesie wynosiły odpowiednio 600 jednostek i 800 jednostek. Opierając się na danych otrzymanych z karty kontrolnej, należy zauważyć, że zakres zmienności jest znacznie większy – naturalne granice zmienności procesu obejmują wartości od 255,2 jednostki do 1041,6 jednostki. Wskazuje to na różnicę pomiędzy rzeczywistą zmiennością procesu a przyjętymi granicami specyfikacji.

Podsumowując, wskaźniki zdolności procesu, mimo ich szerokiego zastosowania, charakteryzują się ograniczeniami związanymi z założeniami dotyczącymi rozkładu danych, ze złożonością procesów, z krótkoterminowymi analizami oraz trudnościami w interpretacji wyników. Ograniczenia te mogą wpływać na skuteczność zarządzania jakością, co wymaga uzupełnienia stosowanych narzędzi lub rozważenia alternatywnych metod oceny zdolności procesów w bardziej skomplikowanych i zmiennych warunkach produkcyjnych.

2.3. Rodzaje zmienności w procesach

Zmienność jest nieodłącznym elementem każdego procesu, niezależnie od jego złożoności. Aby skutecznie zarządzać jakością, konieczne jest zrozumienie i identyfikacja jej źródeł. Poznanie natury zmienności ma kluczowe znaczenie dla organizacji dążących do zwiększenia wydajności, ograniczenia marnotrawstwa oraz poprawy ogólnej jakości.

W celu pełnego zrozumienia procesów zachodzących w organizacjach ważne jest dogłębne zbadanie zagadnień jakości, co wiąże się z analizą zakresu i źródeł powstającej zmienności. Jest to kluczowe w kontekście poprawy ogólnej jakości przedsiębiorstwa. Mimo że coraz więcej procesów produkcyjnych jest przynajmniej częściowo zautomatyzowanych, należy pamiętać o właściwej interpretacji rozkładu danych. Niewłaściwa identyfikacja jej źródeł może prowadzić do poważnych konsekwencji w postaci błędnych decyzji, skutkujących bezpośrednio przeregulowaniem procesów i w efekcie – znaczącym wzrostem wariancji. Ważnym elementem w dążeniu do poprawy jakości poprzez minimalizację zmienności procesów jest zidentyfikowanie i wyeliminowanie źródeł występowania w przypadku zmienności specjalnej. Natomiast w przypadku zmienności naturalnej istotną rolę odgrywają identyfikacja i jej minimalizowanie.

Rewolucję w rozumieniu zmienności w procesach produkcyjnych i jakościowych przeprowadził Walter A. Shewhart, wskazując na istnienie zmienności przewidywalnej (naturalnej) oraz nieprzewidywalnej (specjalnej), a także opracowując metody kontroli zmienności, takie jak karty kontrolne²³⁵. Pełne rozróżnienie czynników definiujących różnice między tymi rodzajami zmienności wymaga implementacji właściwej strategii zarządzania jakością oraz kontroli procesów produkcyjnych. Należy podkreślić, że rozróżnienie rodzaju ma kluczowe znaczenie dla odpowiedniego i skutecznego podejmowania decyzji w obszarze produkcyjnym²³⁶.

Zasadniczą cechą odróżniającą zmienność naturalną od specjalnej jest to, że źródła pochodzą z samego procesu i stanowią wynik wielu równocześnie działających, trudnych do zidentyfikowania czynników. Z kolei zmienność specjalna wynika bezpośrednio z czynników zewnętrznych i jest nieprzewidywalna²³⁷. Dla zmienności naturalnej otrzymywane wartości parametrów jakości są spójne, stabilne i przewidywalne. Warto zaznaczyć, że poziom tej zmienności jest przewidywalny w pewnych granicach, a poszczególne wartości tworzące zmienność procesu odpowiadają wielu trudnym do zdefiniowania źródłom. Właściwa interpretacja zmienności gwarantuje odpowiednie działania, mające na celu poprawę jakości i efektywności, podczas gdy błędne zrozumienie może skutkować nieefektywnymi lub wręcz szkodliwymi interwencjami²³⁸.

Na rysunku 2.19 przedstawiono rozkład danych w kontekście zmienności naturalnej. Charakteryzuje się ona wartościami skupionymi wokół średniej, a poziom wariancji jest stosunkowo niewielki. Istotne jest, że jej obecność nie wymaga natychmiastowej interwencji w procesie, lecz koncentruje się na długoterminowych działaniach, mających na celu zrozumienie przyczynowo-skutkowego ciągu procesu w celu redukcji występującej zmienności.

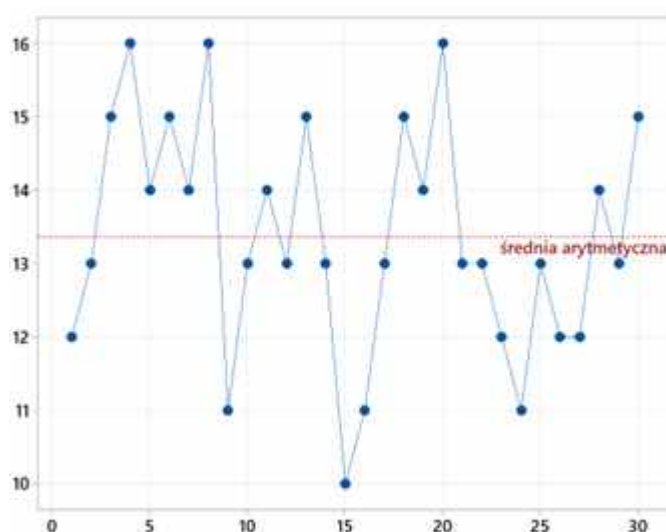
²³⁵ M. Mohammed [i in.], *Bristol, Shipman, and clinical governance: Shewhart's forgotten lessons*, „The Lancet” 2001, vol. 357, s. 463–467.

²³⁶ X. Lei, C.A. MacKenzie, *Distinguishing between common cause variation and special cause variation in a manufacturing system: A simulation of decision making for different types of variation*, „International Journal of Production Economics” 2020, vol. 220, 107446.

²³⁷ M. Gupta, H.C. Kaplan, *Using Statistical Process Control to Drive Improvement in Neonatal Care*, „Clinics in Perinatology” 2017, vol. 44, no. 3, s. 627–644.

²³⁸ T. Young [i in.], *Detecting special-cause variation ‘events’ from process data signatures*, „Journal of Applied Statistics” 2019, vol. 46, s. 3032–3043.

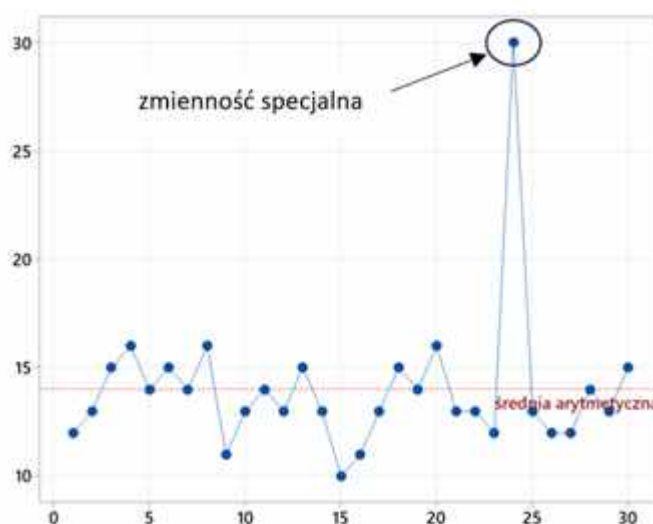
Rysunek 2.19. Rozkład danych – zmienność naturalna



Źródło: opracowanie własne przy użyciu programu Minitab Statistical Software 22

Zmienność specjalna, przedstawiona na rysunku 2.20, wynika z konkretnych, identyfikowalnych źródeł pochodzących spoza procesu, które powodują znaczące odchylenia od wartości charakterystycznych dla naturalnej zmienności procesu. W odróżnieniu od zmienności naturalnej zmienność specjalna jest zazwyczaj spowodowana pojedynczą przyczyną, na którą należy zareagować natychmiastowo.

Rysunek 2.20. Rozkład danych – zmienność specjalna



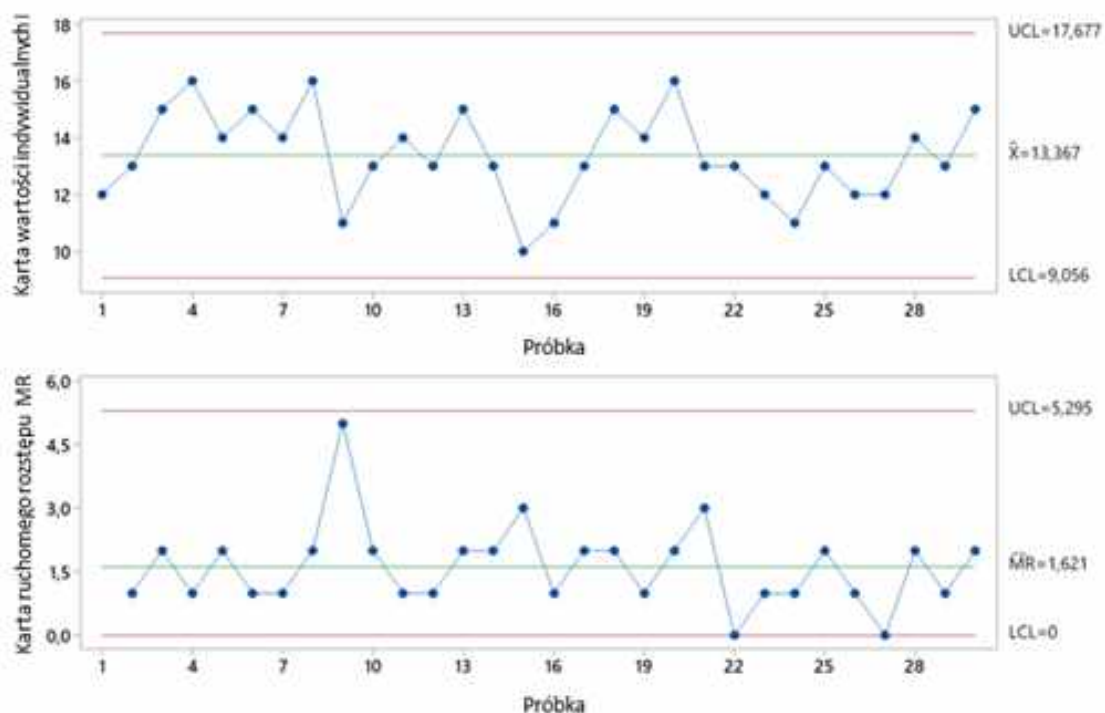
Źródło: opracowanie własne przy użyciu programu Minitab Statistical Software 22

Statystyczna kontrola procesu jest jednym z rozwiązań umożliwiających kontrolowanie, monitorowanie oraz doskonalenie procesów poprzez analizę statystyczną.

Kluczowym narzędziem w obrębie SPC są karty kontrolne, pozwalające na wykrywanie zmian w procesach produkcyjnych, co w efekcie prowadzi do zmniejszenia wariancji w procesach przemysłowych.

Identyfikacja rodzaju zmienności stanowi podstawę działań w zakresie optymalizacji procesów. Na rysunku 2.21 przedstawiona została karta kontrolna wartości indywidualnych i ruchomego rozstępu IMR, ilustrująca rozkład tych samych danych, które zaprezentowano na rysunku 2.19. Należy podkreślić, że w analizowanym przypadku nie stwierdzono obecności zmienności specjalnej, o czym świadczy fakt, że wszystkie punkty na karcie MR znajdują się w obrębie dolnej i górnej granicy kontrolnej. Karta wartości indywidualnych I przedstawia natomiast rzeczywistą zmienność procesu, zwracając uwagę na zmienność w krótkim terminie, ponieważ wszystkie punkty na karcie I mieszczą się w wyznaczonych granicach.

Rysunek 2.21. Karta wartości indywidualnych I oraz ruchomego rozstępu MR – zmienność naturalna

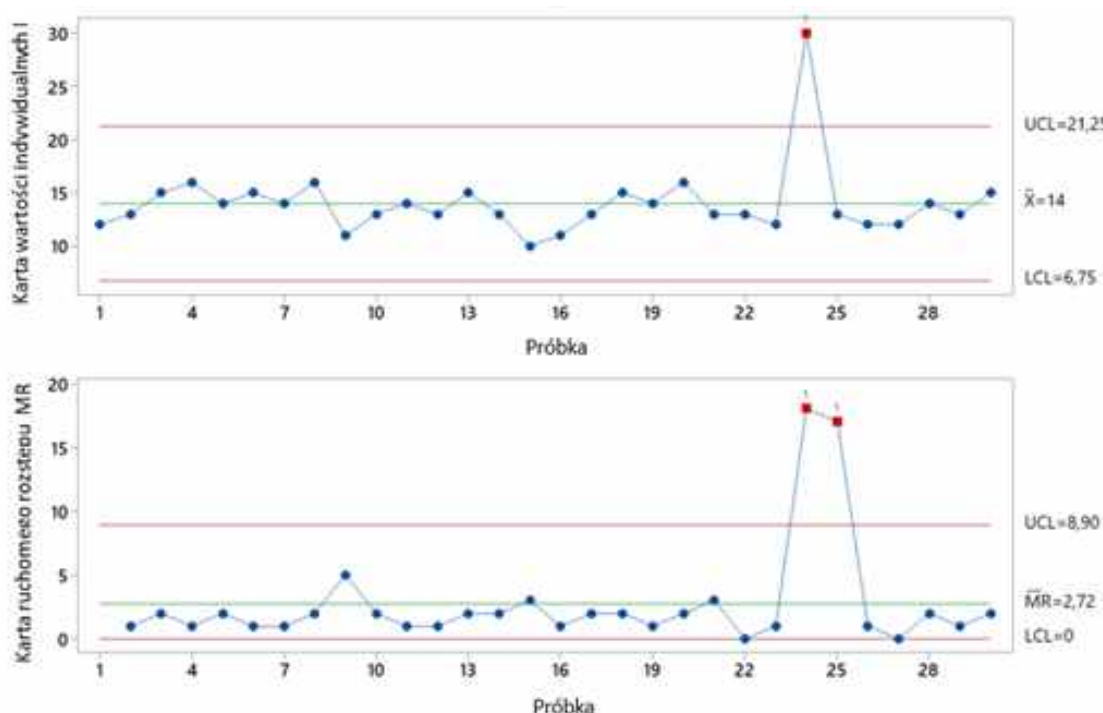


Źródło: opracowanie własne przy użyciu programu Minitab Statistical Software 22

Zmienność specjalna jest obecna w procesie, w którym przynajmniej jeden z punktów przekroczy wartość LCL lub UCL. Na rysunku 2.22 przedstawiono przypadek zaprezentowany na rysunku 2.20. Należy podkreślić, że identyfikacja zmienności

specjalnej na karcie rozstępu R opiera się na takich samych zasadach jak w przypadku kart ruchomego rozstępu MR. Karty kontrolne zostały szeroko opisane w podrozdziale 2.2.1. Pomimo tego, że jeden z punktów na karcie wartości indywidualnych I przekracza wyznaczone granice kontrolne, nie stanowi to potwierdzenia zmienności długoterminowej (rysunek 2.22). Wynika to z braku występowania trendów oraz wyraźnego zaznaczenia dryfu danych.

Rysunek 2.22. Karta wartości indywidualnych I oraz ruchomego rozstępu MR – zmienność specjalna



Źródło: opracowanie własne przy użyciu programu Minitab Statistical Software 22

Odpowiednie zarządzanie zmiennością, jej identyfikacja oraz przyjęty kierunek działań wpływają na wydajność produkcji, zarządzanie kosztami i ogólną jakość produktu. W środowisku produkcyjnym zmienność wynikająca z przyczyn naturalnych, wpisanych w proces, może zostać zredukowana poprzez poznanie przyczyn źródłowych w celu zrozumienia ciągu przyczynowo-skutkowego.

W przypadku zmienności specjalnej wymagane jest podejście reaktywne, polegające na podejmowaniu natychmiastowych działań naprawczych w celu rozwiązania konkretnych problemów powodujących odchylenia. Reaktywne działanie,

jeśli nie jest skutecznie zarządzane, prowadzi do zwiększonych kosztów operacyjnych i przestojów²³⁹.

Jednym z podstawowych ograniczeń i trudności w rozróżnianiu zmienności naturalnej oraz specjalnej jest złożoność procesów i ich wielowymiarowość. Wiele procesów jest uwarunkowanych licznymi czynnikami, co sprawia, że wyodrębnienie konkretnych przyczyn zmienności może stanowić wyzwanie. W konsekwencji może to prowadzić do błędnego przypisywania zmienności z przyczyn specjalnych do przyczyn naturalnych, co skutkuje niepożądanymi działaniami wprowadzającymi nowe źródła zmienności i niestabilności²⁴⁰.

Jako istotne ograniczenie w rozróżnianiu źródeł zmienności należy również wskazać karty kontrolne, stosowane do wykrywania zmian w zachowaniu procesu. Dane użyte do przygotowania kart kontrolnych mogą nie być wystarczające, ponieważ karty Shewharta są silnie wrażliwe na wielkość próby oraz rozkład danych. Gdy wielkość próby jest zbyt mała lub dane nie są zgodne z rozkładem normalnym, karty kontrolne mogą dawać fałszywe sygnały, prowadząc do błędnych wniosków w ujęciu rodzaju zmienności występującej w procesie²⁴¹. Opisane ryzyko jest szczególnie wyraźne w środowiskach, w których gromadzenie danych staje się sporadyczne lub niespójne, ponieważ brak solidnych danych może zaciemniać prawdziwy charakter zmienności obecnej w procesie²⁴². Z uwagi na ten element wyłączone poleganie na kartach kontrolnych, bez pełnego zrozumienia ich ograniczeń, może zwiększyć ryzyko niewłaściwej identyfikacji rodzaju zmienności występującej w procesie.

Aby zobrazować przypadek błędnej identyfikacji rodzaju zmienności, warto wskazać potencjalne skutki. W procesach produkcyjnych, gdy wystąpi zmienność specjalna w postaci awarii maszyny, ale zostanie zidentyfikowana jako zmienność naturalna, działania organizacji nie będą ukierunkowane na podjęcie natychmiastowych działań naprawczych. Skutkować to będzie kontynuacją produkcji wadliwych produktów,

²³⁹ P. Dawda, M. Raymond, *Measurement for improvement*, „InnovAiT: Education and Inspiration for General Practice” 2017, vol. 10, no. 1, s. 51–56.

²⁴⁰ G. Tse [i in.], *Using Clinical Decision Support Systems to Decrease Intravenous Acetaminophen Use: Implementation and Lessons Learned*, „Applied Clinical Informatics” 2024, vol. 15, no. 1, s. 64–74; X. Lei, C.A. MacKenzie, *Distinguishing between...*

²⁴¹ N. Premarathna, A.J.R. Godfrey, K. Govindaraju, *Decomposition of stock market trade-offs using Shewhart methodology*, „International Journal of Quality & Reliability Management” 2016, vol. 33, no. 9, s. 1311–1331.

²⁴² T. Marshall, M.A. Mohammed, *Case-mix and the use of control charts in monitoring mortality rates after coronary artery bypass*, „BMC Health Services Research” 2007, vol. 7, s. 1–9.

zwiększając marnotrawstwo oraz niezadowolenie klientów²⁴³. Natomiast gdy zmienność naturalna zostanie błędnie zidentyfikowana jako specjalna, niepotrzebne interwencje mogą zakłócić proces, prowadząc do zwiększonej zmienności i nieefektywności operacyjnej.

Odpowiednie szkolenia i edukacja w zakresie zrozumienia statystycznej kontroli procesu oraz właściwej identyfikacji rodzaju występującej zmienności mają kluczowe znaczenie w ograniczaniu ryzyka błędnych decyzji. Należy zaznaczyć, że skuteczna identyfikacja zmienności nie opiera się wyłącznie na umiejętnościach technicznych w stosowaniu kart kontrolnych, ale także na zdolności do szerszego rozpoznawania kontekstu monitorowanych procesów²⁴⁴. Wspierając kulturę ciągłego uczenia się i doskonalenia, organizacje mogą zwiększyć zdolność do dokładnego rozróżniania między powszechnymi a szczególnymi przyczynami zmienności, zmniejszając prawdopodobieństwo kosztownych błędów.

Podsumowując, ograniczenia i ryzyko związane z nieprawidłowym rozróżnieniem pomiędzy zmiennością z przyczyn zwykłych a zmiennością z przyczyn specjalnych są znaczące. Błędna identyfikacja może prowadzić do nietrafionych działań naprawczych, strat finansowych i kultury strachu, która tłumi innowacje. Aby ograniczyć to ryzyko, organizacje powinny inwestować w szkolenia i edukację, zapewniając, że decydenci posiadają niezbędne umiejętności i wiedzę do dokładnej interpretacji danych dotyczących zmienności. W ten sposób mogą zwiększyć wydajność operacyjną, poprawić jakość produktów i utrzymać zaufanie klientów. Kluczowa jest również umiejętność wielopłaszczyznowej interpretacji danych, która wraz z narzędziami statystycznymi stanowi nieodłączny element skutecznych działań w zakresie identyfikacji rodzaju występującej zmienności.

2.4. Analiza systemu pomiarowego

Analiza systemu pomiarowego stanowi kluczowy element zapewniający dokładność i wiarygodność informacji procesowych gromadzonych w różnych branżach. Aby możliwa była właściwa interpretacja wyników zebranych w procesie, konieczne jest potwierdzenie poprawności wykonywanych pomiarów. Każdy pomiar jest bowiem

²⁴³ J.L. Chiem [i in.], *An Opioid-free Anesthesia Protocol for Pediatric Strabismus Surgery: A Quality Improvement Project*, „Pediatric Quality & Safety” 2021, vol. 6, no. 5, e462; X. Lei, C.A. MacKenzie, *Distinguishing between...*

²⁴⁴ T.R. Vetter, D. Morrice, *Statistical Process Control: No Hits, No Runs, No Errors?*, „Anesthesia & Analgesia” 2019, vol. 128, no. 2, s. 374–382.

procesem, dlatego niezbędne staje się określenie poziomu jego zmienności. MSA wykorzystywana jest jako podstawowe narzędzie w zakresie poprawy jakości zbieranych danych²⁴⁵. Istota jej działania polega na porównaniu dwóch źródeł zmienności: pochodzącej z systemu pomiarowego oraz wynikającej z samego procesu. Nadrzędny cel MSA stanowi ustalenie, czy zdolność do wykonania pomiaru kształtuje się na właściwym poziomie. Metoda umożliwia także ilościowe określenie dokładności, precyzji oraz stabilności analizowanego przypadku²⁴⁶.

W obrębie analizy systemu pomiarowego ważne jest zidentyfikowanie rodzaju zmienności wpływającej na pomiary. Wyróżnia się zmienność naturalną oraz zmienność wynikającą z przyczyn specjalnych. Pierwsza z nich jest nieodłącznie związana z procesem, a także stabilna (w pewnych granicach). Zmienność wynikająca z przyczyn specjalnych jest zazwyczaj łatwiejsza do zidentyfikowania i nie wymaga dogłębnej analizy statystycznej. Identyfikacja i ograniczanie zmienności mają kluczowe znaczenie dla poprawy dokładności i wiarygodności pomiarów.

Wśród charakterystyk systemu pomiarowego wyróżnia się: rozdzielczość, precyzję/powtarzalność, dokładność, przesunięcie/odtwarzalność oraz stabilność. Każda z nich odgrywa znaczącą rolę w ocenie skuteczności analizowanego systemu.

Rozdzielczość stanowi zdolność systemu pomiarowego do rozróżniania kolejnych pomiarów w aspekcie mierzonej zmiennej. Im wyższa jej wartość, tym większe prawdopodobieństwo wykrycia zmian, co jest szczególnie istotne w przypadku procesów charakteryzujących się wysokim poziomem dokładności oraz precyzji. Badanie przeprowadzone przez Wang i in. podkreśla znaczenie projektowania zoptymalizowanych systemów pomiarowych w celu zwiększenia poziomu rozdzielczości, co ma znaczący wpływ na uzyskiwane wartości z pomiarów²⁴⁷.

Precyzja oraz powtarzalność odnoszą się do zmienności między pomiarami tej samej cechy dla tej samej części (rysunek 2.23), podczas gdy pomiar dokonywany jest przez tę samą osobę, przy użyciu tego samego przyrządu pomiarowego. Jaworski i in. w swoich badaniach zwracają uwagę na znaczenie oceny powtarzalności i odtwarzalności w zautomatyzowanych systemach pomiarowych, szczególnie w zastosowaniach

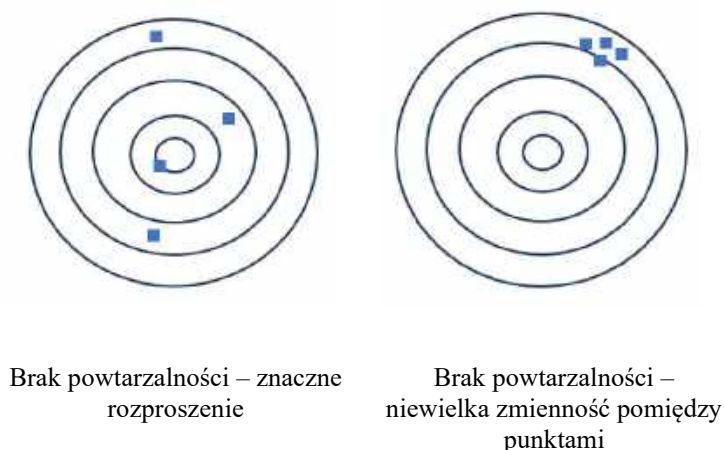
²⁴⁵ M.I. Kovalev, *Measuring Systems Application Analysis in Engineering*, w: *Advances in Automation: Proceedings of the International Russian Automation Conference*, 2020, s. 732–743.

²⁴⁶ A. Yadav, *Measurement Systems Analysis and a Study of ANOVA Method*, „International Journal of Research in Engineering and Technology” 2016, vol. 5, no. 2, s. 123–127.

²⁴⁷ X.Z. Wang, H. Zhou, Z.S. Zhai, *Research on Improving the Measurement Accuracy of Laser Interferometer System*, „Key Engineering Materials” 2013, vol. 562, s. 1021–1026.

przemysłowych, w których wymagany jest wysoki poziom dokładności²⁴⁸. Ponadto autorzy podkreślają, że właściwe zrozumienie powtarzalności i odtwarzalności ma istotne znaczenie w ocenie zdolności systemu pomiarowego do generowania wiarygodnych danych.

Rysunek 2.23. Porównanie rozrzutu wyników przy braku powtarzalności oraz przy wysokiej powtarzalności

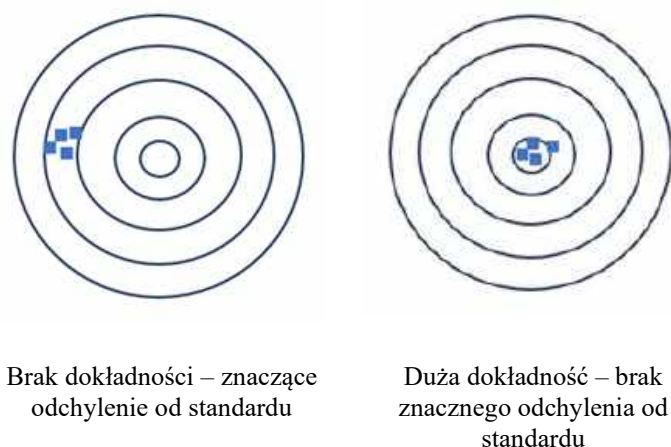


Źródło: opracowanie własne na podstawie: T. Greber, *Analiza systemu pomiarowego (MSA)*, StatSoft, 2002, s. 31–38

Kolejną charakterystyką systemu pomiarowego jest dokładność. Wskazuje ona na różnicę pomiędzy zaobserwowaną średnią wartością pomiaru a wartością nominalną. Należy podkreślić, że wartość nominalna stanowi zaakceptowane, możliwe do zidentyfikowania odniesienie. Dokładność może być oceniona poprzez porównanie ogólnej średniej do przyjętego standardu. Na rysunku 2.24 przedstawiono przykłady braku dokładności oraz sytuację, w której proces charakteryzuje się wysokim poziomem dokładności w uzyskiwanych pomiarach.

²⁴⁸ J. Jaworski, R. Kluz, T. Trzepieciński, *Research on Accuracy of Automatic System for Casting Measuring*, „Archives of Foundry Engineering” 2016, vol. 16, no. 3, s. 49–54.

Rysunek 2.24. Analiza dokładności pomiarów. Przykład znaczącego odchylenia od wartości wzorcowej (brak dokładności) oraz pomiarów o wysokiej dokładności (bliskość do wartości wzorcowej)



Źródło: opracowanie własne na podstawie: P. Pajzderski, T. Iglantowicz, *Dokładność metody pomiarowej a niepewność pomiaru – próba analizy*, „Pomiary Automatyka Kontrola” 2000, vol. 46, s. 14–16

Istotne jest rozróżnienie między dokładnością a precyzją, ponieważ system pomiarowy może być precyzyjny, ale nie dokładny. Oba pojęcia, choć często wykorzystywane są w języku potocznym zamiennie, odnoszą się do zupełnie różnych charakterystyk w analizie systemu pomiarowego (rysunek 2.25). Literatura dostarcza wielu spostrzeżeń w aspekcie obu definicji, podkreślając, że zrozumienie różnicy między precyzją a dokładnością ma kluczowe znaczenie dla procesów kontroli jakości, szczególnie w środowiskach produkcyjnych, w których specyfikacje produktów muszą być spełnione²⁴⁹. Autorzy zaznaczają, że system pomiarowy musi być zarówno precyzyjny, jak i dokładny, aby zapewnić, że wytwarzane produkty spełniają wymagane standardy jakości. Liu i in. omawiają natomiast szybką metodę oceny dokładności pomiaru punktów przestrzennych w wielkoskalowych systemach pomiarowych, podkreślając, że dokładność musi być oceniana w połączeniu z precyzją, aby zapewnić kompleksową ocenę²⁵⁰. Ponadto na dokładność systemów pomiarowych mogą wpływać różne czynniki, wśród których najczęściej pojawia się niewłaściwa kalibracja instrumentów. Wskazuje się znaczenie zarówno precyzji, jak i dokładności, stwierdzając, że system pomiarowy powinien być oceniany na podstawie jego zdolności do

²⁴⁹ X.Z. Wang, H. Zhou, Z.S. Zhai, *Research on Improving...*, s. 1021–1026.

²⁵⁰ Y. Liu [i in.], *A Fast Evaluation Method for Spatial Point Measurement Accuracy in a Large-Scale Measurement System*, „Electronics” 2024, vol. 13, no. 13, 2428.

generowania wyników, które są zarówno spójne, jak i bliskie prawdziwej wartości²⁵¹. Należy zaznaczyć, że pojęcie niepewności pomiaru jest ściśle związane zarówno z precyzją, jak i dokładnością. Według Międzynarodowej Organizacji Normalizacyjnej (ISO) niepewność pomiaru obejmuje błędy przypadkowe, a także systematyczne, i jest niezbędna do oceny wiarygodności wyników pomiarów²⁵². Norma ISO 5725 zawiera wytyczne dotyczące określania dokładności i precyzji metod pomiarowych, podkreślając potrzebę kompleksowego zrozumienia obu pojęć w kontekście oceny systemu pomiarowego.

Rysunek 2.25. Rozróżnienie pomiędzy dokładnością a precyzją w aspekcie analizy systemu pomiarowego



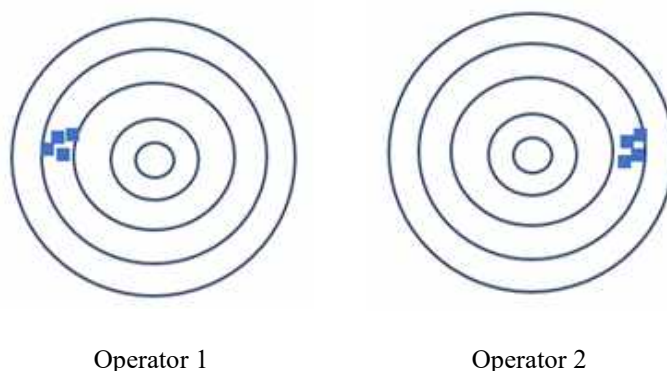
Źródło: opracowanie własne na podstawie: T. Greber, *Analiza systemu pomiarowego (MSA)*, StatSoft, 2002, s. 31–38

Przesunięcie/odtwarzalność stanowi kolejną charakterystykę systemu pomiarowego. Wskazuje ono na systematyczną różnicę między średnią wartością pomiarów a wartością referencyjną. Jeśli przy pomiarze tej samej cechy przez różnych operatorów lub przy użyciu różnych maszyn pomiarowych pojawia się stałe odchylenie od wartości referencyjnej, oznacza to, że w systemie pomiarowym występuje przesunięcie. Na rysunku 2.26 przedstawiono widoczne przesunięcie pomiędzy operatorami, co świadczy o braku odtwarzalności.

²⁵¹ J. Jaworski, R. Kluz, T. Trzepieciński, *Research on Accuracy...*, s. 49–54.

²⁵² D. Dichev [i in.], *An algorithm for improving the accuracy of systems measuring parameters of moving objects*, „Metrology and Measurement Systems” 2016, vol. 23, no. 4, s. 555–565.

Rysunek 2.26. Przesunięcie pomiędzy operatorami – brak zastępowalności



Źródło: opracowanie własne na podstawie: T. Greber, *Analiza systemu pomiarowego (MSA)*, StatSoft, 2002, s. 31–38

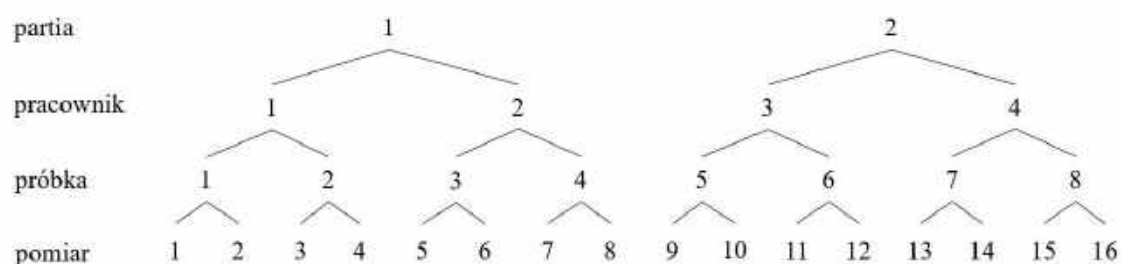
Ostatnią z charakterystyk systemów pomiarowych jest stabilność, która wskazuje na zdolność procesu pomiarowego do utrzymania odpowiedniego poziomu rozdzielczości, powtarzalności (precyzji), dokładności oraz przesunięcia (odtwarzalności) w czasie. Stabilność systemu pomiarowego jest kluczowa dla jakości gromadzonych danych oraz procesów decyzyjnych podejmowanych na ich podstawie. Ponadto obejmuje zrozumienie źródeł zmienności i określenie ich wpływu na wyniki pomiarów. W związku z tym analiza systemów pomiarowych jest wykorzystywana do identyfikacji i ilościowego określenia tych źródeł, co w razie potrzeby umożliwia wdrożenie ukierunkowanych działań naprawczych.

Karty kontrolne stanowią przykład narzędzia szeroko wykorzystywanego w statystycznej kontroli procesu. Umożliwiają one właściwą interpretację rezultatów w odniesieniu do zgodności systemu pomiarowego oraz jego zmienności w kontekście zmienności całkowitej procesu, co podkreśla ich znaczącą rolę w obszarze analizy²⁵³.

Określenie zmienności wynikającej z systemu pomiarowego w zależności od strategii próbkowania najczęściej odnosi się do wielokrotnego pomiaru tej samej części. Przykład drzewa próbkowania w formie schematu zbierania danych dla oceny systemu pomiarowego przedstawiono na rysunku 2.27. W przykładzie uwzględniono dwie partie produkcyjne materiału oraz czterech laborantów. Każdy z nich wykonał po dwa pomiary dla dwóch próbek.

²⁵³ M. Diering, A. Hamrol, A. Kujawińska, *Measurement System Analysis Combined with Shewhart's Approach*, „Key Engineering Materials” 2015, vol. 637, s. 7–11.

Rysunek 2.27. Przykładowe drzewo próbkowania – analiza systemu pomiarowego (MSA)



Źródło: opracowanie własne na podstawie przykładowych danych eksperymentalnych

Analiza graficzna z wykorzystaniem kart kontrolnych $\bar{X}$ -R umożliwia kompleksową identyfikację charakterystyk systemu pomiarowego. Karta rozstępu R pozwala ocenić, czy rozdzielczość jest wystarczająca oraz określić charakter zmienności – naturalnej lub specjalnej. Ponadto wskazuje na spójność, stabilność i przewidywalność zmienności pomiarów. Natomiast karta wartości średnich $\bar{X}$ definiuje precyzję systemu pomiarowego, czyli jego zdolność do wykazywania różnic między mierzonymi częściami oraz ocenę przesunięcia i odtwarzalności w odniesieniu do operatorów procesu.

Aby przeprowadzić właściwą analizę danych, należy ustalić, czy wartości uzyskane podczas próbkowania odzwierciedlają pełną zmienność procesu. W tym celu porównuje się dane historyczne przedstawione na histogramie, obejmujące całą historię pomiarów, z wynikami bezpośrednio z etapu próbkowania. Jeżeli analizowane wartości nie uwzględniają całkowitej zmienności procesu, konieczne jest powtórzenie etapu zbierania danych.

Kompleksowe zdefiniowanie w zakresie charakterystyk systemu pomiarowego umożliwia karta kontrolna $\bar{X}$ -R – rysunek 2.28. Została ona wygenerowana na podstawie drzewa próbkowania przedstawionego na rysunku 2.27.

Rysunek 2.28. Karta kontrolna Xbar-R na podstawie schematu drzewa próbkowania



Źródło: opracowanie własne przy użyciu programu Minitab Statistical Software 22

Analizując kartę rozstępu R przedstawioną na rysunku 2.28, można zweryfikować rozdzielczość systemu pomiarowego. W tym celu należy przeprowadzić obliczenia zgodnie z poniższym wzorem:

$$\text{Minimalna liczba jednostek pomiarowych} = \frac{UCL_R}{\text{jednostka pomiarowa}} + 1 \quad (22)$$

Wartość górnej granicy kontrolnej (UCL_R) wyznacza karta R, natomiast jednostka pomiarowa oznacza najmniejszą wartość, jaką przyrząd pomiarowy jest w stanie zmierzyć. Podstawiając dane do wzoru, otrzymujemy:

$$\text{Minimalna liczba jednostek pomiarowych} = \frac{22,87}{1} + 1 = 23,87 \quad (23)$$

Biorąc pod uwagę, że wielkość podgrupy wynosiła $n = 2$, zgodnie ze stałymi przedstawionymi w tabeli 2.3, każda wartość wyniku na poziomie ≥ 4 wskazuje, że rozdzielczość systemu pomiarowego w obrębie analizowanego procesu znajduje się na odpowiednim poziomie (rysunek 2.27).

Tabela 2.3. Wartości minimalnej liczby jednostek pomiarowych w odniesieniu do wielkości podgrupy

Wielkość podgrupy n	Minimalna liczba jednostek pomiarowych
2	4
3	5
4	5
5	5
6	6

Źródło: opracowanie własne na podstawie: Automotive Industry Action Group, *Measurement Systems Analysis (MSA) Reference Manual*, AIAG, 2010, s. 1–227

Dodatkowo każda z wartości mieści się między dolną (LCL_R) i górną (UCL_R) granicą na karcie R, co wskazuje, że zmienność pomiar do pomiaru ma charakter naturalny.

Precyzję systemu pomiarowego ocenia się za pomocą karty wartości średnich $\bar{X}$. Gdy wszystkie punkty mieszczą się wewnątrz wyznaczonych granic kontrolnych, oznacza to, że system pomiarowy nie jest wystarczająco precyzyjny. Świadczy to o tym, że zmienność pomiar do pomiaru dominuje nad zmiennością procesu, a jakiegokolwiek zmiany w procesie mogą być trudno wykrywalne ze względu na istotny błąd pomiarowy – taka sytuacja wystąpiła w analizowanym przykładzie. Aby system pomiarowy mógł zostać uznany za precyzyjny, szacuje się, że więcej niż 50% pomiarów powinno znajdować się poza granicami kontrolnymi wyznaczonymi przez kartę wartości średnich $\bar{X}$.

W tabeli 2.4 przedstawiono minimalną liczbę punktów poza granicami kontrolnymi w ujęciu wielkości podgrupy n, aby system pomiarowy mógł zostać uznany za precyzyjny.

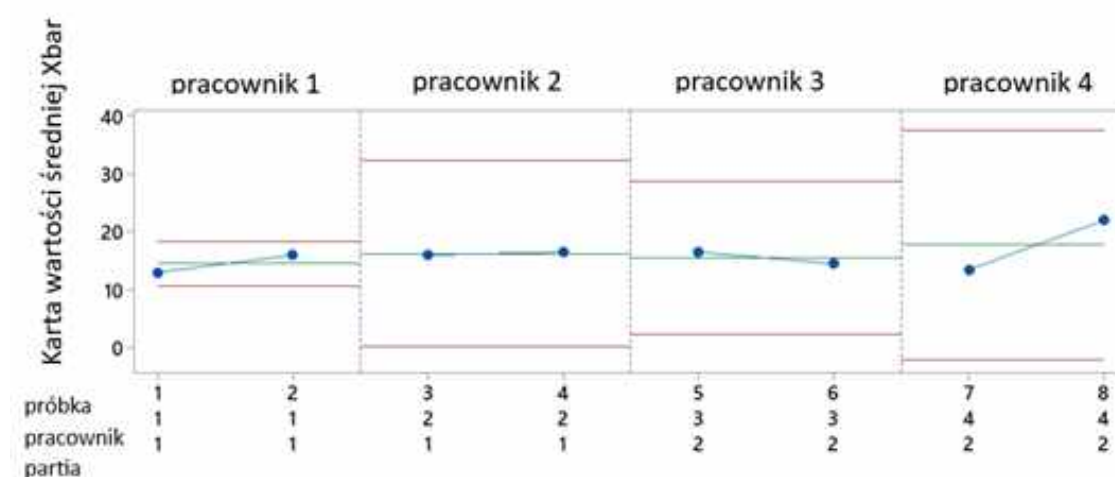
Tabela 2.4. Wartości minimalnej liczby punktów poza granicami kontrolnymi w odniesieniu do wielkości podgrupy

Wielkość podgrupy n	Minimalna liczba punktów poza granicami kontrolnymi
2	50%
3	60%
4-6	70%
7-13	80%
14-50	90%
>50	100%

Źródło: opracowanie własne na podstawie: Automotive Industry Action Group, *Measurement Systems Analysis (MSA) Reference Manual*, AIAG, 2010, s. 1–227

Aby określić przesunięcie i odtwarzalność, należy przyrzeć się karcie wartości średnich $\bar{X}$. Dzieląc kartę kontrolną na cztery sekcje – zgodnie z liczbą pracowników – możliwe jest dokładniejsze określenie uzyskiwanych pomiarów. Na rysunku 2.29 zilustrowano kartę kontrolną $\bar{X}$ z uwzględnieniem podziału na poszczególnych pracowników.

Rysunek 2.29. Karta kontrolna $\bar{X}$ z uwzględnieniem podziału na poszczególnych pracowników – powtarzalność i odtwarzalność



Źródło: opracowanie własne przy użyciu programu Minitab Statistical Software 22

Pracownicy 2 i 3 odznaczają się wysokim poziomem odtwarzalności, a między nimi brakuje wyraźnego przesunięcia. Pracownik 1 charakteryzuje się nieco niższym poziomem odtwarzalności, lecz uzyskane wartości nie eliminują go z procesu. Przesunięcie pracownika 1 w stosunku do 2 i 3 jest nieznaczne. W przypadku pracownika 4 zauważalny jest najniższy poziom odtwarzalności oraz największe przesunięcie względem pozostałych pracowników, jednak otrzymane wartości nie eliminują go z procesu. W dalszej analizie należałoby wyjaśnić, czym spowodowane jest odchylenie w próbie 2 dla pracownika 4.

Na podstawie wykreowanych kart kontrolnych należy stwierdzić, że dominującym źródłem zmienności jest zmienność pomiar do pomiaru (wszystkie punkty na karcie $\bar{X}$ mieszczą się w wyznaczonych granicach kontrolnych), co sprawia, że system pomiarowy nie jest odpowiedni, a dalsza analiza przyczynowo-skutkowa w obrębie procesu może prowadzić do poważnych konsekwencji, takich jak błędna interpretacja danych lub podjęcie działań, które mogą jeszcze bardziej zaburzyć jego funkcjonowanie. Sama rozdzielczość procesu nie stanowi problemu. Zdecydowanie gorzej przedstawia się

parametr precyzji, który w analizowanym przypadku nie jest akceptowalny. W pierwszej kolejności, przed podjęciem jakichkolwiek działań, konieczna jest zatem poprawa systemu pomiarowego.

Ocena systemu pomiarowego pozwala na zidentyfikowanie i wyeliminowanie błędów pomiarowych, co przyczynia się do poprawy jakości danych poddawanych dalszej analizie. Odgrywa kluczową rolę w zarządzaniu jakością procesu, umożliwiając stwierdzenie, czy system pomiarowy jest zgodny. Odpowiednie zebranie wartości na etapie próbkowania daje możliwość jednoczesnej weryfikacji poprawności systemu pomiarowego, a także zdefiniowania rozkładu zmienności.

Należy zwrócić uwagę, że implementacja MSA wiąże się często z ograniczeniami, które wpływają na wydajność systemów pomiarowych oraz wnioski wyciągane w obrębie prowadzonych analiz. Niezawodność systemów pomiarowych jest często oceniana za pomocą badań powtarzalności i odtwarzalności. Badania przeprowadzone przez Browne i in. analizują zmienność pomiarów ze względu na sam system pomiarowy, uwzględniając czynniki takie jak różnice między operatorami i warunki środowiskowe. Podkreśla się, że standardowy plan oceny systemu pomiarowego zazwyczaj obejmuje pobieranie próbek części i wielokrotne pomiary każdej części przez wielu operatorów, co może pomóc w identyfikacji źródeł zmienności. Podejście to może być jednak ograniczone liczbą operatorów i próbek, potencjalnie prowadząc do niepełnego zrozumienia systemu pomiarowego oraz jego zmienności²⁵⁴.

Wiele systemów pomiarowych charakteryzuje się dużą złożonością, obejmującą elementy takie jak przyrządy, protokoły i metody analizy danych. Może ona stanowić wyzwanie podczas implementacji oraz interpretacji uzyskanych wartości. Flynn omawia, w jaki sposób zautomatyzowane systemy pomiarowe zależą od udanej integracji różnych komponentów w celu wykonywania dokładnych pomiarów²⁵⁵. Złożoność systemów może wymagać specjalistycznych szkoleń – ich brak zwiększa ryzyko błędów użytkownika, co w rezultacie może skutkować obniżeniem skuteczności systemu pomiarowego.

Wdrażanie i utrzymywanie systemów pomiarowych może wymagać znacznych zasobów. Wysokie koszty związane z zaawansowanymi narzędziami pomiarowymi,

²⁵⁴ R.P. Browne, R.J. MacKay, S.H. Steiner, *Leveraged Gauge R&R Studies*, „Technometrics” 2010, vol. 52, no. 3, s. 294–302.

²⁵⁵ M. Flynn, *Regression analysis of automated measurement systems*, w: *IEEE Autotestcon*, Salt Lake City, UT, Sep. 8-11, 2008, s. 536–542.

szkoleniem pracowników oraz gromadzeniem danych mogą przekładać się na ograniczenia w zakresie wykonalności niektórych systemów pomiarowych, zwłaszcza w środowiskach o ograniczonych zasobach. Al-Refaie i Bata podkreślają istotę oceny systemów pomiarowych za pomocą badań powtarzalności i odtwarzalności, które mogą pomóc organizacjom w ocenie ich opłacalności. Jednak konieczność poniesienia kosztów związanych z implementacją systemu może prowadzić do różnic w dostępie do narzędzi pomiaru jakości²⁵⁶.

Chociaż systemy pomiarowe są niezbędne w gromadzeniu i analizie danych w wielu branżach, należy mieć na uwadze ograniczenia, które mogą wpływać na ich skuteczność. Błędy pomiarów wynikające ze złożoności systemów, ograniczenia kosztowe oraz kwestie wiarygodności odgrywają istotną rolę w kształtowaniu wydajności systemów pomiarowych. Zrozumienie tych ograniczeń ma kluczowe znaczenie w podejmowaniu świadomych decyzji dotyczących projektowania, implementacji oraz interpretacji danych.

2.5. Mapowanie procesu

Mapowanie procesu stanowi graficzne przedstawienie przepływu pracy w procesie, umożliwiając jego szczegółową analizę. Technika mapowania znajduje zastosowanie w wielu dziedzinach. Wykorzystywana jest zarówno w obszarze operacyjnym, jak i strategicznym w celu zwiększenia wydajności poprzez identyfikację nieefektywności oraz wskazania obszarów wymagających poprawy. Dodatkowo ułatwia komunikację w zakresie operacji czy procesów jednostkowych realizowanych w jego obrębie.

Mapowanie procesu ma charakter złożony (rysunek 2.30). Zawiera w sobie składowe obejmujące specyfikację zadań, identyfikację podmiotów odpowiedzialnych za ich realizację oraz określenie warunków realizacji zadań poprzez kluczowe wskaźniki efektywności. Te kompleksowe ramy sprawiają, że wszystkie elementy procesu są udokumentowane, co jest niezbędne do skutecznego zarządzania i dalszej optymalizacji²⁵⁷.

Pierwszy etap mapowania stanowi określenie działań tworzących przepływ pracy. Wymaga to zebrania informacji od osób zaangażowanych w proces, aby upewnić się, że

²⁵⁶ A. Al-Refaie, N. Bata, *Evaluating measurement and process capabilities by GR&R with four quality measures*, „Measurement” 2010, vol. 43, no. 6, s. 842–851.

²⁵⁷ M. Tukiran [i in.], *Implementation of Business Process Mapping Framework for Indonesia's Government Institutions*, „Jurnal Studi Pemerintahan” 2023, vol. 13, no. 2, s. 281–306.

wszystkie zadania zostały uwzględnione. Następnie należy przypisać odpowiedzialność za ich realizację, co umożliwi stworzenie przejrzystej struktury w organizacji. Istotne jest, aby zadania tworzące przepływ pracy były uporządkowane w sposób chronologiczny, tworząc spójną oś czasu, odzwierciedlającą sekwencję wykonywanych działań. Odpowiednie ułożenie i zachowanie kolejności ma kluczowe znaczenie dla zrozumienia zależności oraz identyfikacji potencjalnych wąskich gardeł w procesie²⁵⁸.

Gdy zidentyfikowane zostaną działania w ramach strumienia procesu, przypisane będą odpowiedzialności za realizację poszczególnych zadań, a całość zostanie uporządkowana zgodnie z chronologią, konieczne jest właściwe zwizualizowanie przepływu pracy. Do tego celu można zastosować różne narzędzia i techniki, od prostych diagramów blokowych po bardziej zaawansowane aplikacje umożliwiające dynamiczne mapowanie wraz z równoległą analizą. Wybór narzędzia często zależy od złożoności mapowanego procesu i specyficznych potrzeb organizacji.

Diagramy przepływu to graficzne przedstawienia sekwencji działań, ich wzajemnych zależności oraz przepływu czynności tworzących określony proces. Skuteczność map procesu uwarunkowana jest w dużej mierze ich konstrukcją i wartością merytoryczną. Poprawnie skonstruowany diagram może znacząco uprościć złożone procesy, podczas gdy jego nieprawidłowe opracowanie może prowadzić do niewłaściwych interpretacji i w efekcie do dezorientacji²⁵⁹. Wyróżnia się kilka rodzajów diagramów przepływu.

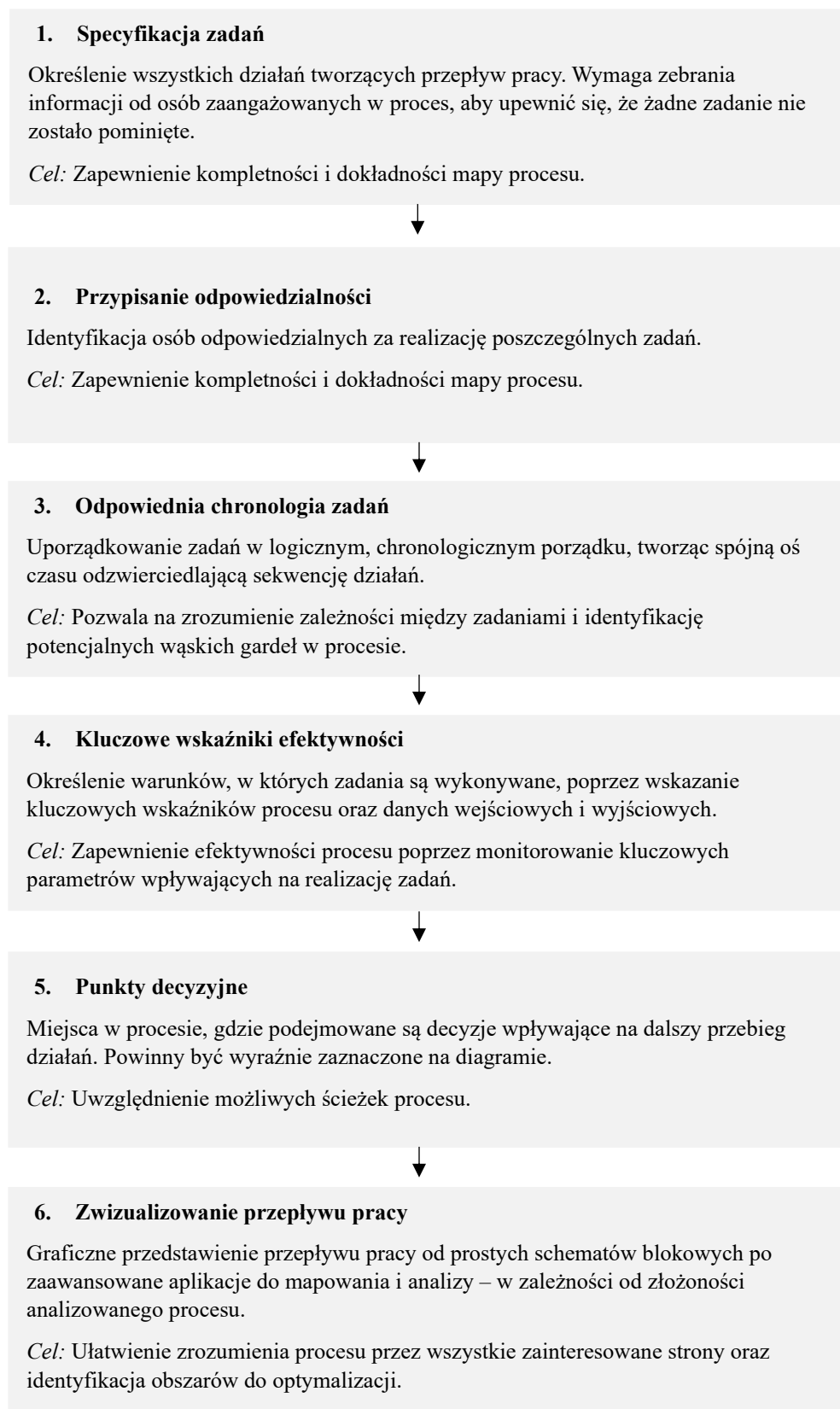
Diagramy przepływu w formie schematów blokowych kładą nacisk na prostotę i czytelność, umożliwiając użytkownikom łatwe zrozumienie w ujęciu analizowanych procesów (rysunek 2.31). Często wykorzystują one standardowe symbole reprezentujące poszczególne elementy. Przykładowo kwadraty oznaczają składowe procesu – operacje lub działania jednostkowe, diamenty wskazują punkty decyzyjne, a strzałki przedstawiają kierunek przepływu²⁶⁰.

²⁵⁸ Tamże.

²⁵⁹ S. Ahmed, A.F. Mohammed, *From process flows to benchmark in an accident and emergency hospital with PERT approach*, „Kybernetes” 2019, vol. 48, no. 3, s. 520–545.

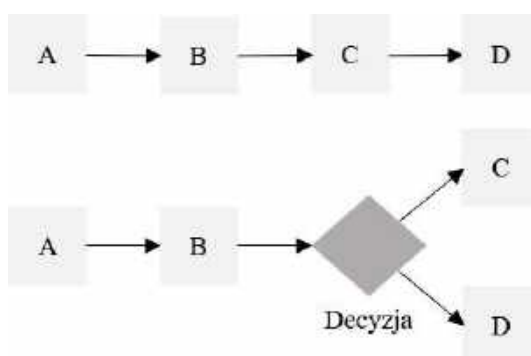
²⁶⁰ J. Polpinij, A.K. Ghose, H.K. Dam, *Business Rules Discovery from Process Design Repositories*, w: *6th World Congress on Services*, 2010, s. 614–620.

Rysunek 2.30. Poszczególne elementy mapowania procesu



Źródło: opracowanie własne na podstawie: M. Tukiran, N.P. Sari, L.D. Tjitrabudi, N. Amalia, *Implementation of Business Process Mapping Framework for Indonesia's Government Institutions*, „Jurnal Studi Pemerintahan” 2023, vol. 13, no. 2, s. 281–306

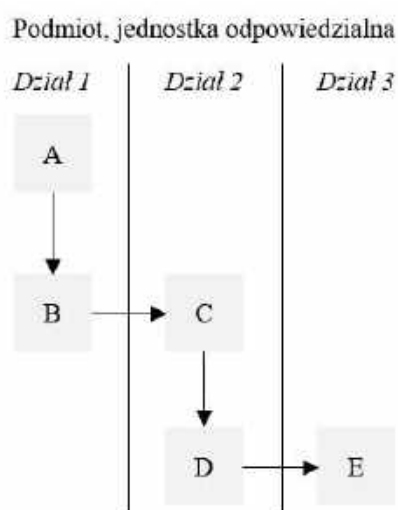
Rysunek 2.31. Struktura prostych diagramów przepływu – mapowanie procesu



Źródło: opracowanie własne na podstawie: P.R. Scholtes, *The Leader's Handbook: Making Things Happen, Getting Things Done*, McGraw-Hill, 1998, s. 1–415

Sposób przygotowania diagramu przepływu jest uwarunkowany wewnętrznymi potrzebami organizacji. Może on przyjmować formę prostego diagramu, diagramu zstępującego uwzględniającego kolejne podkroki w obrębie realizowanych działań lub diagramu przepływu zależności, przedstawiającego czas i sekwencję kroków w układzie pionowym, wskazując na wzajemne interakcje między poszczególnymi jednostkami zaangażowanymi w proces (rysunek 2.32). Te typy diagramów rozszerzają koncepcję schematów blokowych, dzieląc zadania na sekcje i uwzględniając różne działy organizacji czy jednostki uczestniczące w procesie.

Rysunek 2.32. Struktura diagramu zależności – mapowanie procesu



Źródło: opracowanie własne na podstawie: P.R. Scholtes, *The Leader's Handbook: Making Things Happen, Getting Things Done*, McGraw-Hill, 1998, s. 1–415

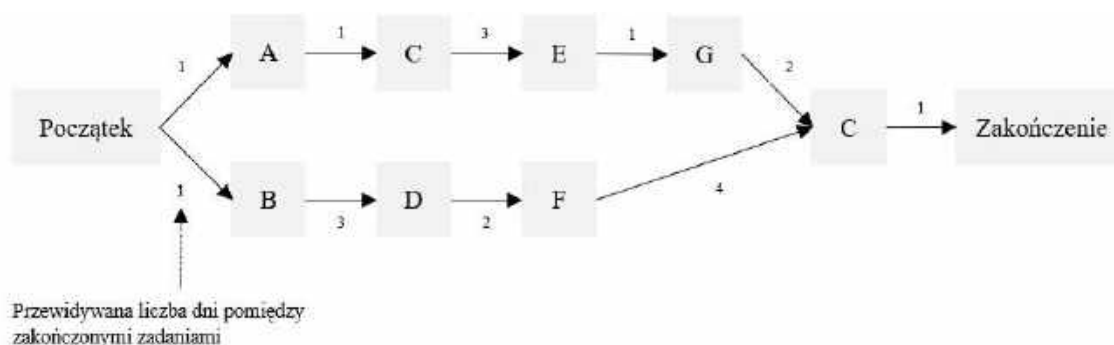
Każda sekcja zawiera konkretne zadania lub decyzje związane z daną rolą, co pozwala na wyraźne rozgraniczenie obowiązków. Zasadniczą zaletą diagramów przepływu

zależności jest ich zdolność do podkreślania współzależności między różnymi rolami, ułatwiając identyfikację odpowiedzialności za poszczególne części procesu, a uzyskana przejrzystość prowadzi do poprawy efektywności realizowanych zadań.

Wykresy PERT (*program evaluation and review technique*) ukazują bardzo szczegółowo wiele równoczesnych ścieżek przepływu procesu. Uwzględniają one również przewidywany czas pomiędzy poszczególnymi zadaniami w strumieniu, umożliwiając kierownikom projektów, szefom obszarów identyfikację ścieżki krytycznej – najdłuższej sekwencji zależnych zadań, która określa minimalny czas trwania projektu²⁶¹.

Struktura oraz przejrzystość, jaką nadaje diagram PERT, ma kluczowe znaczenie ze względu na fakt, że jest on ukierunkowany na przekazywanie złożonych współzależności w sposób łatwy do zinterpretowania przez osoby zaangażowane (rysunek 2.33). Jest to szczególnie ważne w przedsięwzięciach o ściśle określonych terminach, w przypadku których zrozumienie relacji między zadaniami i czasu ich trwania może znacząco wpłynąć na ogólny sukces²⁶². Główną zaletą wykresów PERT jest ich zdolność do ułatwiania planowania i alokacji zasobów. Pomagają one śledzić postępy, zapewniając, że zadania w obrębie strumienia procesu są wykonywane terminowo. Są wyjątkowo przydatne w złożonych procesach, w których wiele zadań musi być koordynowanych, ponieważ oferują jasny przegląd osi czasu realizowanego procesu.

Rysunek 2.33. Struktura wykresu PERT – mapowanie procesu



Źródło: opracowanie własne na podstawie: P.R. Scholtes, *The Leader's Handbook: Making Things Happen, Getting Things Done*, McGraw-Hill, 1998, s. 1–415

²⁶¹ L.C. Chang, *Rethinking the Project Management Process by Using Unified Modeling Language*, „International Journal of Information Technology Project Management” 2015, vol. 6, no. 3, s. 58–73.

²⁶² N. Sundström, B. Lennartson, *Event-and time-based design of operation sequences with uncertainties in execution times*, w: *18th Conference on Emerging Technologies & Factory Automation (ETFA)*, 2013, s. 1–8.

Iteracyjny charakter mapowania procesów stanowi istotny element. Należy podkreślić, że w przypadku gdy organizacje implementują początkowe założenia, prezentując standard przepływu pracy, często okazuje się, że z biegiem czasu konieczne jest jego doskonalenie. Iteracje powodują, że proces jest poddawany ciągłemu usprawnianiu, ponieważ organizacje dostosowują się do nowych informacji lub zmieniających się okoliczności.

Iteracje są szczególnie uwydatnione w koncepcji GIGA-mappingu, czyli metodzie wykorzystywanej w projektowaniu systemowym. Pozwala ona na kompleksową wizualizację złożonych systemów, ich powiązań oraz wzajemnych współzależności. Od standardowego mapowania procesu różni się kilkoma elementami – przede wszystkim brakiem koncentracji na procesach liniowych oraz skupieniem na szerszym kontekście, zwracając uwagę na relacje, sprzężenia zwrotne i wpływy zewnętrzne²⁶³.

Proces mapowania może pełnić funkcję obiektu granicznego, ułatwiającego komunikację i współpracę między różnymi działami organizacji czy interesariuszami zaangażowanymi w proces. Zapewniając wizualną reprezentację przepływów pracy, mapy procesów mogą pomóc wypełnić luki, sprzyjając wspólnemu zrozumieniu celów i wyzwań. Jest to szczególnie istotne w projektach interdyscyplinarnych, w których członkowie zespołu mogą odznaczać się różnymi perspektywami i specjalistyczną wiedzą.

Warto zauważyć, że mapowanie procesów nie ogranicza się wyłącznie do kontekstów biznesowych czy edukacyjnych. Ma także zastosowanie w badaniach środowiskowych i kulturowych. Doskonałym przykładem są techniki mapowania partycypacyjnego, które zostały wykorzystane do zaangażowania społeczności w dokumentację dóbr kultury i zasobów środowiskowych²⁶⁴. Opisane podejścia podkreślają znaczenie lokalnej wiedzy i perspektyw w procesie mapowania, zapewniając, że powstałe mapy są oparte na realiach społeczności, które reprezentują.

Dodatkowo proces mapowania może pomóc organizacjom w wydobyciu ukrytej wiedzy, czyli takiej, która jest trudna do przekazania lub zapisana w działaniach, a nie w formalnych dokumentach. Ambrosini i Bowman podkreślają, że tego rodzaju wiedza stanowi kluczowy element dla firm, które opierają swoje działania na wiedzy – pozwala

²⁶³ E. Kvam, *Giga-Mapping and Knowledge of Boundary Object Theory in Sustainable Product Development*, w: *Proceedings of the 23rd International Conference on Engineering and Product Design Education*, 2021, s. 1–6.

²⁶⁴ F. McConachie [i in.], *Barapa Country through Barapa eyes: Cultural mapping of Gunbower Island, Australia*, „*Journal of Maps*” 2020, vol. 16, no. 1, s. 13–20.

to na utrzymanie i budowanie przewagi konkurencyjnej. W przeprowadzonych badaniach zastosowano interaktywne podejście do mapowania przyczynowego, ukierunkowane na pomoc pracownikom w identyfikacji i zrozumieniu czynników przyczyniających się do sukcesu organizacji. Umożliwia ono zrozumienie złożonych relacji pomiędzy działaniami a wynikami, dając szansę uchwycenia wiedzy, która wcześniej była nieuchwytna²⁶⁵.

Pomimo szerokiego zastosowania w wielu branżach mapowanie procesów posiada ograniczenia, które mogą bezpośrednio wpływać na jego skuteczność. Jednym z najważniejszych ograniczeń jest możliwość nadmiernego uproszczenia złożoności analizowanych procesów. Frei i in. zauważyli, że ramy procesu mapowania mogą nie uchwycić niuansów, specyficznych cech oraz złożoności działań, prowadząc jedynie do powierzchownego zrozumienia²⁶⁶. Może to skutkować pominięciem znaczących etapów w strumieniu procesu, co ostatecznie może wpłynąć na decyzje dotyczące proponowanych rozwiązań. Ponadto w przypadku złożonych procesów pojedyncza mapa może okazać się niewystarczająca do adekwatnego przedstawienia wszystkich elementów, co wymaga zastosowania większej liczby map lub dodatkowych warstw szczegółów, które mogą jeszcze bardziej skomplikować analizę²⁶⁷. Dodatkowo sekwencyjny charakter diagramów przepływu może być mylący w dynamicznych środowiskach, w których procesy nie są ściśle liniowe, prowadząc do błędnej interpretacji interakcji między zadaniami²⁶⁸.

Kolejne ograniczenie stanowi zależność skuteczności diagramów przepływu i wykresów PERT od znajomości praktyk stosowanych przy ich tworzeniu. Barroso i in. wskazują, że brak podstawowych zasad oraz standardów może prowadzić do nieporozumień wśród członków zespołu, którzy mogą różnie interpretować opracowane schematy, komplikując tym samym komunikację i współpracę²⁶⁹.

Podobnie jak diagramy przepływu wykresy PERT, pomimo szerokiego zastosowania w planowaniu i zarządzaniu procesami oraz projektami, również mają swoje ograniczenia. Jednym z kluczowych jest ich zależność od dokładnych szacunków

²⁶⁵ V. Ambrosini, C. Bowman, *Surfacing tacit sources of success*, „International Small Business Journal” 2008, vol. 26, no. 4, s. 403–431.

²⁶⁶ R. Frei, L. Jack, S.A. Krzyżaniak, *Mapping Product Returns Processes in Multichannel Retailing: Challenges and Opportunities*, „Sustainability” 2022, vol. 14, no. 3, 1382.

²⁶⁷ Tamże.

²⁶⁸ S.N. Yeşiloğlu [i in.], *Development and Use of Flowcharts for Identifying Types of Isomers and Naming Coordination Compounds*, „Journal of Chemical Education” 2021, vol. 98, no. 6, s. 1988–1996.

²⁶⁹ W.J.S. Barroso [i in.], *Implementation of 5S Program in a Building Site of a Predial Reform in Manaus City*, „International Journal for Innovation Education and Research” 2019, vol. 7, no. 11, s. 837–849.

czasowych dla poszczególnych działań. Engwall zwraca uwagę, że szacunki dotyczące czasu mogą być niedokładne lub nadmiernie optymistyczne, co może prowadzić do problemów z terminową realizacją zadań²⁷⁰. Poleganie wyłącznie na szacunkach może powodować odchylenia od zaplanowanych harmonogramów, zwłaszcza w obliczu nieprzewidzianych okoliczności lub czynników zewnętrznych powodujących opóźnienia. Perlijar podkreśla, że niedokładne oszacowanie czasu prowadzi do zakłóceń przepływu produkcji, co w konsekwencji stanowi źródło opóźnień i nieefektywności całego procesu. W środowiskach produkcyjnych, w których zadania charakteryzują się zmiennością i nieprzewidywalnością, statyczny charakter PERT może skutkować nieaktualnymi harmonogramami, które nie odzwierciedlają rzeczywistych warunków, utrudniając zarządzanie czasem w obszarze produkcji²⁷¹.

Nadmierna koncentracja na ścieżce krytycznej, czyli najdłuższej sekwencji działań od początku do końca procesu, może prowadzić do braku holistycznego spojrzenia na wszystkie zależności i zadania w ramach procesu. Lermen i in. podkreślają, że skupienie się wyłącznie na zadaniach wpisanych w ścieżkę krytyczną może skutkować niepełnym zrozumieniem całości procesu²⁷².

Ponadto, aby mapowanie procesu było skuteczne, konieczne są regularne aktualizacje i przeglądy przygotowanych diagramów. Statyczny charakter map może prowadzić do nieaktualnych reprezentacji przepływu pracy, co może negatywnie wpływać na podejmowanie decyzji i alokację zasobów.

Podsumowując, mimo opisanych ograniczeń wykresy PERT oraz diagramy przepływu pozostają kluczowymi narzędziami w obrębie mapowania procesów. Wyzwania takie jak poleganie na szacunkach czasowych, koncentracja jedynie na ścieżce krytycznej, ryzyko nadmiernego uproszczenia czy przestarzałości – braku aktualizacji stanowią przeszkody w ich efektywnym wykorzystaniu. Uwzględnienie ograniczeń wymaga dogłębnego zrozumienia środowiska produkcyjnego i może wiązać się z integracją technik czy narzędzi uzupełniających w celu zwiększenia ogólnej wydajności i skuteczności.

²⁷⁰ M. Engwall, *PERT, Polaris, and the realities of project execution*, „International Journal of Managing Projects in Business” 2012, vol. 5, no. 4, s. 595–616.

²⁷¹ A. Perlijar, *Maintenance Analysis of Ripple Mill Machine Using PERT Method at PT Ujong Neubok Dalam*, „Jurnal Inotera” 2023, vol. 8, no. 1, s. 198–202.

²⁷² F.H. Lermen [i in.], *Optimization of times and costs of project of horizontal laminator production using PERT/CPM technical*, „Independent Journal of Management & Production” 2016, vol. 7, no. 3, s. 833–853.

2.6. Projektowanie eksperymentów

Projektowanie eksperymentów (*design of experiments*, DoE) to kompleksowe podejście do planowania, realizacji i analizy eksperymentów. Jego celem jest uzyskanie najbardziej wartościowych danych dotyczących badanego procesu, co umożliwia identyfikację czynników i parametrów wpływających na zmienność oraz zrozumienie ciągu przyczynowo-skutkowego całego systemu. Poprzez odpowiednio zaprojektowane badania DoE dąży do stworzenia warunków sprzyjających zdobyciu wiedzy niezbędnej do efektywnego sterowania procesem, podkreślając tym samym znaczenie starannego planowania eksperymentów.

Istotnym elementem pozostaje odróżnienie projektowania eksperymentów od quasi-eksperymentów. Quasi-eksperymenty, w przeciwieństwie do DoE, charakteryzują się brakiem randomizacji, a badania prowadzone są w rzeczywistych warunkach. Wykorzystuje się je w przypadkach, w których implementacja założeń projektowania eksperymentów jest niemożliwa lub niepraktyczna. Natomiast DoE opiera się na ściśle określonych warunkach badawczych, a także losowym przypisaniu jednostek do analizowanych grup eksperymentalnych, co pozwala na uwzględnienie potencjalnych zakłóceń układu.

W badaniach Andersena i in. wskazano, że w quasi-eksperymentach grupy uczestników są ustalone z góry, co oznacza, że nie można ich swobodnie przypisywać do określonych warunków badawczych²⁷³. Z kolei Rogers i Révész podkreślają, że quasi-eksperymenty starają się naśladować warunki badań randomizowanych, lecz wykorzystują grupy porównawcze, co może powodować trudności w ustaleniu związku przyczynowo-skutkowego analizowanego procesu²⁷⁴.

Historia DoE sięga początków XX wieku. Kluczowy wkład w rozwój wnieśli statystycy, zwłaszcza Ronald A. Fisher, który położył fundamenty nowoczesnego projektowania eksperymentalnego poprzez prace nad analizą wariancji (ANOVA) i eksperymentami czynnikowymi²⁷⁵. Kolejną ważną postacią w ewolucji DoE jest Gen'ichi Taguchi, który wprowadził innowacyjne podejście do projektowania eksperymentów w kontekście zarządzania jakością. Jego metoda umożliwia identyfikację

²⁷³ H.B. Andersen [i in.], *Activating schoolyards: study design of a quasi-experimental schoolyard intervention study*, „BMC Public Health” 2015, vol. 15, no. 1, s. 1–10.

²⁷⁴ J. Rogers, A. Révész, *Experimental and quasi-experimental designs*, w: *The Routledge Handbook of Research Methods in Applied Linguistics*, pod red. nauk. J. McKinleya, H. Rose, Routledge, London 2019, s. 133–143.

²⁷⁵ J. Pietraszek, N. Radek, A.V. Goroshko, *Challenges for the DOE methodology related to the introduction of Industry 4.0*, „Production Engineering Archives” 2020, vol. 26, no. 4, s. 190–194.

optymalnych ustawień parametrów procesu, minimalizując wpływ zmienności oraz redukując koszty związane z eksperymentowaniem²⁷⁶.

Metoda Taguchiego składa się z trzech faz: planowania, eksperymentowania i analizy. W pierwszym etapie identyfikowane są czynniki wpływające na proces oraz definiowane są ich poziomy do dalszej analizy. Następnie przeprowadza się zaprojektowane eksperymenty, zbierając dane w kontrolowanych warunkach. Faza analizy obejmuje ocenę wyników w celu określenia wpływu poszczególnych czynników na wydajność procesu i jego zmienność²⁷⁷. Taka struktura nie tylko nadaje ramy działaniom, ale również usprawnia proces eksperymentalny, zwiększając wiarygodność wyników, co czyni ją wartościową w różnych dziedzinach nauki²⁷⁸. Podejście Taguchiego zyskało na znaczeniu w latach 80. XX wieku w związku z poszukiwaniem skutecznych strategii poprawy jakości i obniżenia kosztów produkcji²⁷⁹. Umożliwiło efektywne projektowanie eksperymentów przy jednoczesnym znacznym zmniejszeniu liczby prób niezbędnych do uzyskania statystycznie istotnych wyników²⁸⁰.

Znaczenie metody Taguchiego jest szczególnie widoczne w optymalizacji złożonych procesów. Przykładowo w sektorze produkcyjnym została ona zastosowana do zwiększenia efektywności poprzez odpowiedni dobór parametrów procesowych, zmniejszając zmienność procesu²⁸¹. Wykorzystując opracowane podejście, badacze mogą zidentyfikować czynniki mające największy wpływ na proces oraz interakcje między nimi, co umożliwia osiągnięcie wyższych standardów jakości²⁸².

Projektowanie eksperymentów znajduje zastosowanie w wielu dziedzinach, takich jak rolnictwo, inżynieria, medycyna czy nauki społeczne. Służy jako narzędzie do zrozumienia wpływu licznych zmiennych na zmienną zależną. Wraz z pojawieniem się koncepcji Przemysłu 4.0 pojawiły się nowe wyzwania i możliwości w zakresie DoE,

²⁷⁶ H. Rowlands, J. Antony, G. Knowles, *An application of experimental design for process optimisation*, „The TQM magazine” 2000, vol. 12, no. 2, s. 78–84.

²⁷⁷ D. Sadeghi [i in.], *Electrospun poly (hydroxybutyrate)/chitosan blend fibrous scaffolds for cartilage tissue engineering*, „Journal of Applied Polymer Science” 2016, vol. 133, no. 47.

²⁷⁸ R.S. Rao [i in.], *The Taguchi methodology as a statistical tool for biotechnological applications: A critical appraisal*, „Biotechnology Journal: Healthcare Nutrition Technology” 2008, vol. 3, no. 4, s. 510–523.

²⁷⁹ H. Rowlands, J. Antony, G. Knowles, *An application...*, s. 78–84.

²⁸⁰ A.K. Dixit, R. Awasthi, *EDM process parameters optimization for Al-TiO₂ Nano Composite*, „International Journal of Materials Forming and Machining Processes” 2015, vol. 2, no. 2, s. 17–30.

²⁸¹ S.J. Kim, K.S. Kim, H. Jang, *Optimization of manufacturing parameters for a brake lining using Taguchi method*, „Journal of Materials Processing Technology” 2003, vol. 136, no. 1–3, s. 202–208.

²⁸² N. Lusi [i in.], *Multiple Performance Optimization in the Wire EDM Process of SKD61 Tool Steel Using Taguchi Grey Relational Analysis and Fuzzy Logic*, „Applied Mechanics and Materials” 2014, vol. 493, s. 523–528.

zwłaszcza w kontekście podejmowania decyzji opartych na danych oraz zrozumienia zmienności procesów²⁸³. Coraz większe poleganie na zaawansowanych technologiach sprawia, że wiele branż integruje DoE w rozwijających się obszarach technologicznych, co prowadzi do optymalizacji poprzez redukcję działań nieprzynoszących korzyści biznesowych, minimalizację strat oraz zapewnienie wysokiej jakości wyników.

DoE w badaniach naukowych zrewolucjonizowało sposób planowania i analizy eksperymentów. Ustrukturyzowane podejście umożliwia systematyczne badanie wpływu wielu czynników na zmienną odpowiedzi, co zwiększa wiarygodność uzyskanych ustaleń. Znaczenie DoE wynika nie tylko z jego zdolności do optymalizacji warunków eksperymentalnych, ale także z możliwości wglądu w interakcje między zmiennymi, które często są pomijane w prostszych schematach badawczych²⁸⁴.

2.6.1. Metody eksperymentowania

W niniejszym podrozdziale opisano metody eksperymentowania, takie jak testowanie jednego czynnika w czasie (*one factor at a time*, OFAT), eksperyment pełnoczynnikowy (*full factorial design*) oraz eksperyment frakcjonowany (*fractional factorial design*).

Metoda OFAT jest podejściem projektowym, w którym bada się wpływ jednej zmiennej na zmienną odpowiedzi procesu, przy jednoczesnym utrzymaniu pozostałych czynników na stałym poziomie. Uznaje się ją za skuteczną w badaniach wstępnych, ukierunkowanych na identyfikację czynników mogących mieć znaczący wpływ na analizowany proces. Pomimo swoich zalet i prostoty zastosowania testowanie jednego czynnika w czasie ma istotne ograniczenia. Przede wszystkim nie umożliwia uchwycenia interakcji między poszczególnymi czynnikami, co utrudnia określenie optymalnych warunków procesu. Ponadto metoda OFAT jest czasochłonna. Irfan i in. zauważają, że może być nieefektywna przy ocenie wpływu wielu czynników²⁸⁵.

Ze względu na powyższe ograniczenia metoda testowania jednego czynnika w czasie jest często odrzucana. Literatura podkreśla konieczność zastosowania bardziej

²⁸³ J. Pietraszek, N. Radek, A.V. Goroshko, *Challenges for the DOE methodology...*, s. 190–194.

²⁸⁴ K.C. Harper, M.S. Sigman, *Predicting and optimizing asymmetric catalyst performance using the principles of experimental design and steric parameters*, „Proceedings of the National Academy of Sciences” 2011, vol. 108, no. 6, s. 2179–2183.

²⁸⁵ M. Irfan [i in.], *Carboxymethyl cellulase production optimization from newly isolated thermophilic Bacillus subtilis K-18 for saccharification using response surface methodology*, „Amb Express” 2017, vol. 7, s. 1–9.

kompleksowych metod, które umożliwiają zrozumienie złożoności systemów, zwłaszcza interakcji między zmiennymi²⁸⁶.

Eksperyment pełnoczynnikowy to statystyczne podejście stosowane w badaniach eksperymentalnych do oceny wpływu wielu czynników na zmienną odpowiedzi. Pozwala on badać wszystkie możliwe kombinacje poziomów czynników, zapewniając pełne zrozumienie zarówno głównych efektów, jak i interakcji między nimi. Możliwość jednoczesnej oceny wielu czynników nie tylko przyspiesza proces optymalizacji, ale także zwiększa wiarygodność wyników, gdyż uwzględnia potencjalne interakcje, które mogłyby zostać przeoczone w prostszych projektach eksperymentalnych. Ze względu na zdolność do modelowania złożonych systemów jest ona szeroko wykorzystywana w różnych branżach²⁸⁷.

Jedną z głównych zalet eksperymentu pełnoczynnikowego jest jego skuteczność w badaniu interakcji między wieloma zmiennymi. Analizując wszystkie kombinacje czynników, naukowcy mogą określić, w jaki sposób różne poziomy jednego czynnika wpływają na działanie innego. Na przykład w przemyśle spożywczym Chen i in. wykazali, że eksperyment pełnoczynnikowy umożliwił właściwą ocenę efektów interakcji między różnymi czynnikami, co pozwoliło na poprawę jakości produktów²⁸⁸. Podobne wnioski przedstawił Shokri, który zastosował tę metodę w oczyszczaniu ścieków do badania degradacji związków fenolowych, podkreślając jej skuteczność w modelowaniu złożonych procesów środowiskowych²⁸⁹.

Eksperyment pełnoczynnikowy jest szczególnie korzystny, gdy liczba testowanych czynników jest niewielka, ponieważ zapewnia pełne pokrycie obszaru eksperymentu. Należy jednak pamiętać, że wraz ze wzrostem liczby czynników liczba koniecznych prób wzrasta wykładniczo, co może prowadzić do znacznego zwiększenia liczby przebiegów²⁹⁰.

²⁸⁶ S. Ghanbarian, D. Kahforoushan, E. Sahraei, *Determination of significant factors in the removal of Cu (II) from aqueous solutions by applying adsorption method: using factorial design*, „Desalination and Water Treatment” 2016, vol. 57, no. 18, s. 8470–8479.

²⁸⁷ A. Shokri, *Application of Sono-photo-Fenton process for degradation of phenol derivatives in petrochemical wastewater using full factorial design of experiment*, „International Journal of Industrial Chemistry” 2018, vol. 9, s. 295–303.

²⁸⁸ H. Chen [i in.], *Optimization Of Freeze-Dried Starter For Yogurt By Full Factorial Experimental Design*, „Acta Universitatis Cibiniensis. Series E: Food Technology” 2015, vol. 19, no. 2, s. 27–38.

²⁸⁹ A. Shokri, *Application of Sono-photo-Fenton process...*, s. 295–303.

²⁹⁰ W. Luo, M. Pla-Roca, D. Juncker, *Taguchi Design-Based Optimization of Sandwich Immunoassay Microarrays for Detecting Breast Cancer Biomarkers*, „Analytical Chemistry” 2011, vol. 83, no. 14, s. 5767–5774.

W środowiskach produkcyjnych eksperymentowanie pełnoczynnikowe jest wykorzystywane do identyfikacji kluczowych przyczyn zmienności. Thomas i Antony podkreślają jego skuteczność w przemyśle lotniczym, gdzie systematyczne eksperymenty odgrywają kluczową rolę w utrzymaniu wysokich standardów jakości²⁹¹. Identyfikacja najważniejszych czynników wpływających na wydajność procesów i produktów umożliwia organizacjom wdrażanie ukierunkowanych ulepszeń, które zwiększają efektywność i obniżają koszty.

Podsumowując, eksperymenty pełnoczynnikowe stanowią solidne podejście w dziedzinie eksperymentowania. Zapewniają dogłębny wgląd w wpływ wielu czynników oraz ich interakcji, a ich zastosowanie obejmuje liczne branże. Mimo że metoda ta wymaga znacznych zasobów, jest niezbędnym narzędziem w optymalizacji złożonych systemów i procesów.

Kolejną metodą są eksperymenty frakcjonowane, które umożliwiają badaczom skuteczne analizowanie wpływu wielu czynników na zmienną odpowiedzi, jednocześnie redukując liczbę wymaganych przebiegów eksperymentalnych. Podejście to jest szczególnie ważne w złożonych systemach, gdzie wzrost liczby czynników i ich poziomów prowadzi do wykładniczego zwiększenia liczby eksperymentów, jak ma to miejsce w przypadku eksperymentów pełnoczynnikowych. Koncepcja eksperymentów frakcjonowanych jest ściśle powiązana z eksperymentami pełnoczynnikowymi, umożliwiając jednocześnie poznanie wzajemnych interakcji między czynnikami oraz oszacowanie efektów głównych i ich wpływu na wynik. Zastosowanie eksperymentów ułamkowych pozwala badaczom oszczędzać czas i zasoby, jednocześnie umożliwiając uzyskanie cennych informacji o analizowanych procesach. Korzyści płynące z implementacji eksperymentów frakcjonowanych są szeroko opisywane w literaturze. Grice i Montgomery podkreślają ich rolę w skutecznym badaniu wielu czynników, zwracając uwagę na szczególne znaczenie w procesach przemysłowych, gdzie ograniczenia czasowe i kosztowe stanowią istotne wyzwanie. Ponadto autorzy akcentują możliwość oszacowania efektów głównych oraz interakcji bez konieczności przeprowadzania rozbudowanych, złożonych eksperymentów, co sprawia, że cieszą się one dużym zainteresowaniem wśród badaczy z różnych dziedzin²⁹².

²⁹¹ A.J. Thomas, J. Antony, *A comparative analysis of the Taguchi and Shainin DOE techniques in an aerospace environment*, „International Journal of Productivity and Performance Management” 2005, vol. 54, no. 8, s. 658–678.

²⁹² J.V. Grice, D.C. Montgomery, *Design and Analysis of Experiments*, „Technometrics” 2000, vol. 42, no. 2, s. 208–209.

Należy również zwrócić uwagę na takie aspekty jak zbalansowanie oraz ortogonalność, które charakteryzują eksperymenty frakcjonowane, nadając im solidność i niezawodność w analizie statystycznej²⁹³.

Ortogonalność w projektowaniu eksperymentów charakteryzuje sytuację, w której czynniki są niezależne, co pozwala na oszacowanie efektów głównych bez wpływu innych czynników. Podobnie w kwestii interakcji – w ortogonalnych eksperymentach nie są one zakłócone przez efekty główne lub inne interakcje. Ortogonalność umożliwia eliminację współzależności między czynnikami, prowadząc do bardziej precyzyjnych wyników. W przypadku ortogonalnego eksperymentu iloczyn skalarny dla każdej pary różnych kolumn macierzy eksperymentu wynosi zero.

Zbalansowanie odznacza się tym, że liczba obserwacji dla każdej kombinacji poziomów czynników jest jednakowa. Zbalansowany eksperyment umożliwia dokładniejsze określenie wpływu poszczególnych czynników na odpowiedź, ponieważ wszystkie czynniki są równo reprezentowane w zbiorze danych. Brak zbalansowania w macierzy eksperymentu może prowadzić do zafałszowania wyników.

W tabeli 2.5 przedstawiono macrycę eksperymentu pełnoczynnikowego, ilustrującą jego ortogonalność. Przykład dotyczy testów trzech czynników na dwóch poziomach: -1 i 1 . Dla uproszczenia analizy w tabeli zastosowano takie oznaczenia. W analogiczny sposób ortogonalność jest sprawdzana dla eksperymentów frakcjonowanych.

Tabela 2.5. Matryca eksperymentu pełnoczynnikowego dla trzech czynników (A, B, C) testowanych na dwóch poziomach: -1 oraz 1

Czynnik (A)	Czynnik (B)	Czynnik (C)
-1	-1	-1
1	-1	-1
-1	1	-1
1	1	-1
-1	-1	1
1	-1	1
-1	1	1
1	1	1

Źródło: opracowanie własne na podstawie przykładowych danych eksperymentalnych

²⁹³ S. Aoki, A. Takemura, *Design and analysis of fractional factorial experiments from the viewpoint of computational algebraic statistics*, „Journal of Statistical Theory and Practice” 2012, vol. 6, no. 1, s. 147–161.

Mnożąc wartości z kolumny odpowiadającej czynnikom A i B dla poszczególnych wierszy eksperymentu, uzyskujemy:

1. $(-1) \cdot (-1) = 1$
2. $1 \cdot (-1) = -1$
3. $(-1) \cdot 1 = -1$
4. $1 \cdot 1 = 1$
5. $(-1) \cdot (-1) = 1$
6. $1 \cdot (-1) = -1$
7. $(-1) \cdot 1 = -1$
8. $1 \cdot 1 = 1$

Sumując otrzymane wyniki w ujęciu kolumn A i B:

$$1 + (-1) + (-1) + 1 + 1 + (-1) + (-1) + 1 = 0$$

Jako że suma tych wartości wynosi zero, potwierdza to ortogonalność między czynnikami A i B. Aby wykazać ortogonalność całej matrycy eksperymentu, należy sprawdzić, czy iloczyn skalarny każdej pary różnych kolumn (A i B, B i C oraz A i C) również wynosi zero.

Ponadto tabela 2.5 umożliwia ocenę zbalansowania eksperymentu, co potwierdza jednakowa liczba poziomów -1 i 1 dla każdego czynnika.

Wszechstronność zastosowania eksperymentów frakcjonowanych wykracza poza procesy produkcyjne, o czym świadczy ich wykorzystanie w wielu dziedzinach. Znaczenie eksperymentów frakcjonowanych podkreślili Jaynes i in., zwracając uwagę na ich zastosowanie w farmacji, gdzie eksperymenty frakcjonowane zostały użyte do badania różnych kombinacji leków. Badania wykazały, że naukowcy byli w stanie zbadać wiele czynników (leków) i poziomów dawkowania, co pozwoliło na identyfikację interakcji między lekami oraz określenie optymalnych dawek. Uniknięto przy tym konieczności przeprowadzania dużej liczby eksperymentów, co czyni eksperymenty frakcjonowane alternatywą dla pełnoczynnikowych planów eksperymentalnych. W ujęciu prowadzonych badań autorzy przygotowali eksperymenty ułamkowe o liczbie przebiegów od 128 do 4096, pokazując elastyczność i skalowalność podejścia w badaniach farmakologicznych²⁹⁴. Dodatkowo koncepcja eksperymentów

²⁹⁴ J.D.X. Jaynes [i in.], *Application of fractional factorial designs to study drug combinations*, „Statistics in Medicine” 2012, vol. 32, no. 2, s. 307–318.

frakcjonowanych jest wspierana przez Ozoemenę i in., którzy opisują ich zastosowanie w redukcji rozmiaru dużych eksperymentów pełnoczynnikowych, umożliwiając w ten sposób badanie przesiewowe znaczących czynników i interakcji w obrębie aktywnych zmiennych procesowych²⁹⁵.

Babiak i in. zwracają uwagę na zastosowanie eksperymentów frakcjonowanych do badań przesiewowych w kriokonserwacji plemników ryb, podkreślając ich skuteczność w badaniach biologicznych²⁹⁶. W dziedzinie biotechnologii i produkcji przeciwciał eksperymenty frakcjonowane zostały wykorzystane do identyfikacji istotnych interakcji między składnikami odżywczymi, które wpływają na wzrost komórek CHO (*Chinese hamster ovary*) oraz zwiększenie wydajności produkcji przeciwciał. Pomogło to w lepszym zrozumieniu, które składniki odżywcze mają największy wpływ na proces produkcji, jednocześnie redukując liczbę wymaganych prób eksperymentalnych, co optymalizuje cały proces produkcji w skali przemysłowej²⁹⁷. Podobnie Gunst i Mason podkreślają powszechne stosowanie eksperymentów frakcjonowanych w różnych dyscyplinach, zwracając uwagę na ich znaczenie w skutecznym badaniu wpływu kontrolowanych czynników na zmienne odpowiedzi. Szerokie zastosowanie podkreśla ich znaczenie we współczesnych badaniach, ponieważ ułatwiają one badanie złożonych interakcji w sposób efektywny pod względem wykorzystania zasobów²⁹⁸.

Podsumowując, eksperymenty frakcjonowane stanowią efektywne podejście do planowania eksperymentów, które równoważy potrzebę kompleksowej analizy danych dotyczących aktywnych czynników i ich interakcji z praktycznymi ograniczeniami, takimi jak czas i koszty. Literatura dostarcza solidnych podstaw do zrozumienia zasad, zastosowań i matematycznych ram leżących u podstaw eksperymentów ułamkowych, co czyni je niezbędnym narzędziem dla naukowców z różnych dziedzin. W miarę jak złożoność realizowanych procesów nieustannie wzrasta, znaczenie eksperymentów frakcjonowanych w ułatwianiu istotnych spostrzeżeń przy jednoczesnej optymalizacji wykorzystania zasobów będzie tylko rosło.

²⁹⁵ C.E. Ozoemena [i in.], *An experimental strategy for fractionating 33 and 34 factorial experiments*, „International Journal for Quality Research” 2019, vol. 13, no. 3, s. 505–520.

²⁹⁶ I. Babiak, E. Brzuska, J. Perkowski, *Fractional factorial design of screening experiments on cryopreservation of fish sperm*, „Aquaculture Research” 2000, vol. 31, no. 3, s. 273–282.

²⁹⁷ S. Sandadi, S. Ensari, B. Kearns, *Application of Fractional Factorial Designs to Screen Active Factors for Antibody Production by Chinese Hamster Ovary Cells*, „Biotechnology Progress” 2006, vol. 22, no. 2, s. 595–600.

²⁹⁸ R.F. Gunst, R.L. Mason, *Fractional factorial design*, „Wiley Interdisciplinary Reviews: Computational Statistics” 2009, vol. 1, no. 2, s. 234–244.

2.6.2. Eksperyment pełnoczynnikowy a frakcjonowany – wzajemne ograniczenia

Rozróżnienie między eksperymentami pełnoczynnikowymi a frakcjonowanymi stanowi kluczową koncepcję w projektowaniu eksperymentów. Obie metody służą do badania wpływu wielu czynników na zmienną odpowiedzi, jednak różnią się strukturą, efektywnością oraz kontekstami zastosowań²⁹⁹.

Decyzja o wyborze odpowiedniej metody zależy często od specyficznych celów badania, liczby analizowanych czynników oraz dostępnych zasobów. W przeciwieństwie do eksperymentów frakcjonowanych eksperymenty pełnoczynnikowe analizują wszystkie możliwe kombinacje poziomów czynników. Oznacza to, że jeśli istnieje k czynników, każdy na n poziomach, eksperyment pełnoczynnikowy wymagać będzie n^k przebiegów³⁰⁰.

Ogólny wzór pozwalający określić liczbę przebiegów w eksperymencie pełnoczynnikowym:

$$\text{liczba przebiegów} = n^k \quad (24)$$

n – liczba poziomów;

k – liczba czynników w eksperymencie.

Przykład:

dla trzech testowanych czynników na dwóch poziomach eksperyment pełnoczynnikowy wymagałby 8 przebiegów.

$$\text{liczba przebiegów} = 2^3 = 8 \quad (25)$$

Ze względu na swoją wszechstronność eksperymenty pełnoczynnikowe umożliwiają oszacowanie wszystkich efektów głównych oraz interakcji między czynnikami, dostarczając pełnego obrazu wpływu czynników na zmienną odpowiedzi³⁰¹. Jednakże wraz ze wzrostem liczby czynników stają się one niepraktyczne – liczba przebiegów eksperymentu wzrasta wykładniczo.

Alternatywnie eksperymenty frakcjonowane proponują uproszczone podejście, redukując liczbę przebiegów przy zachowaniu kluczowych informacji na temat badanych

²⁹⁹ A. Kwilinski, M. Kardas, *Efficiency of Full and Fractional Factorial Designs in Quality Management: A Case Study on Identifying Key Adhesion Factors*, „Forum Scientiae Oeconomia” 2024, vol. 12, no. 3, s. 138–155.

³⁰⁰ T. Ahmad, M. Akhtar, *Efficient response surface designs for the second-order multivariate polynomial model robust to missing observation*, „Journal of Statistical Theory and Practice” 2015, vol. 9, s. 361–375.

³⁰¹ R.F. Gunst, R.L. Mason, *Fractional...*, s. 234–244.

czynników, przy jednoczesnym minimalizowaniu nakładów czasowych i finansowych³⁰². Są szczególnie użyteczne, gdy interakcje wyższych rzędów są mało prawdopodobne lub nieistotne, co pozwala badaczom skoncentrować się na efektach głównych i interakcjach niższego rzędu bez nadmiernego wykorzystywania zasobów charakterystycznego dla pełnych eksperymentów³⁰³.

Liczbę przebiegów w eksperymencie frakcjonowanym określa się za pomocą poniższego wzoru:

$$\text{liczba przebiegów} = \frac{n^k}{2^p} \quad (26)$$

n – liczba poziomów;

k – liczba czynników;

p – stopień frakcjonowania.

Przykład:

dla czterech testowanych czynników na dwóch poziomach eksperyment frakcjonowany pomniejszony o połowę wymagałby 8 przebiegów.

$$\text{liczba przebiegów} = \frac{2^4}{2^1} = 2^{4-1} = 8 \quad (27)$$

W tabeli 2.6 przedstawiono analizę porównawczą pomiędzy eksperymentem pełnoczynnikowym a frakcjonowanym w odniesieniu do wybranych cech.

Tabela 2.6. Analiza porównawcza pomiędzy eksperymentem pełnoczynnikowym oraz frakcjonowanym w ujęciu wybranych cech

Cecha	Eksperyment pełnoczynnikowy	Eksperyment frakcjonowany (pomniejszony o połowę)
Liczba czynników	3	3
Liczba prób	8	4
Liczba testów na każdym poziomie	4	2
Zbalansowanie	tak	tak
Ortogonalność	tak	tak
Interakcje	tak, wszystkie	tak, niektóre

Źródło: opracowanie własne na podstawie przykładowych danych eksperymentalnych

Zmniejszenie liczby przebiegów w eksperymencie frakcjonowanym prowadzi do aliasowania efektów, które stają się nierozróżnialne na podstawie uzyskanych wartości.

³⁰² W. Luo, M. Pla-Roca, D. Juncker, *Taguchi Design-Based Optimization...*, s. 5767–5774.

³⁰³ D.P. Stolle [i in.], *Fractional factorial designs for legal psychology*, „Behavioral Sciences & the Law” 2002, vol. 20, no. 1–2, s. 5–17.

Oznacza to, że jedno szacowanie efektu reprezentuje sumę kilku efektów i niemożliwe jest ich oddzielne oszacowanie. Zrozumienie struktury aliasów jest zatem kluczowe dla świadomego projektowania eksperymentu oraz właściwej interpretacji wyników.

Na przykład w eksperymencie frakcjonowanym z trzema czynnikami A, B i C efekt główny czynnika A jest aliasowany z interakcją między czynnikami B i C. W konsekwencji jeśli zaobserwujemy istotny efekt, nie możemy jednoznacznie stwierdzić, czy jest on spowodowany działaniem czynnika A, czy interakcją BC.

Aby zilustrować pojęcie aliasów, w tabeli 2.7 zaprezentowano macierz pełnego eksperymentu, w którym każda kolumna stanowi unikatowy zestaw plusów i minusów, co umożliwia niezależne oszacowanie efektów poszczególnych czynników.

Tabela 2.7. Matryca eksperymentu pełnoczynnikowego

Przebieg	A	B	C	AB	AC	BC	ABC	Otrzymana wielkość
1	–	–	–	+	+	+	–	60
2	+	–	–	–	–	+	+	89
3	–	+	–	–	+	–	+	70
4	+	+	–	+	–	–	–	11
5	–	–	+	+	–	–	+	15
6	+	–	+	–	+	–	–	28
7	–	+	+	–	–	+	–	34
8	+	+	+	+	+	+	+	67

Źródło: opracowanie własne na podstawie przykładowych danych eksperymentalnych

Opierając się na wartościach z kolumny „Otrzymana wielkość”, obliczono wartość efektu głównego czynnika A (tabela 2.7).

$$E_A = \bar{Y}_{A+} - \bar{Y}_{A-} \quad (28)$$

E_A – efekt główny czynnika A;

$\bar{Y}_{A+}$ i $\bar{Y}_{A-}$ – średnie odpowiedzi dla poziomów czynnika A.

$$E_A = \frac{89 + 11 + 28 + 67}{4} - \frac{60 + 70 + 15 + 34}{4} = 48,75 - 44,75 = 4 \quad (29)$$

Obliczona wartość efektu głównego A wynosi 4.

Efekty interakcji BC obliczane są według poniższego wzoru:

$$E_{BC} = \overline{BC}^+ - \overline{BC}^- \quad (30)$$

E_{BC} – efekt interakcji czynników BC;

$\overline{BC}^+$ i $\overline{BC}^-$ – średnie odpowiedzi na poziomach kombinacji.

$$E_{BC} = \frac{60 + 89 + 34 + 67}{4} - \frac{70 + 11 + 15 + 28}{4} = 62,5 - 31 = 31,5 \quad (31)$$

Efekt interakcji BC wynosi 31,5.

W tabeli 2.8 zaprezentowano ten sam eksperyment, lecz w ujęciu frakcjonowanym. Należy zaobserwować, że matryca eksperymentu została zredukowana, a całkowita liczba przebiegów ograniczona do czterech.

Tabela 2.8. Matryca eksperymentu frakcjonowanego

Przebieg	A	B	C	AB	AC	BC	ABC	Otrzymana wielkość
1								
2	+	-	-	-	-	+	+	89
3	-	+	-	-	+	-	+	70
4								
5	-	-	+	+	-	-	+	15
6								
7								
8	+	+	+	+	+	+	+	67

Źródło: opracowanie własne na podstawie przykładowych danych eksperymentalnych

W tym eksperymencie frakcjonowanym (tabela 2.8) zrealizowano jedynie połowę przebiegów. Zgodnie z przyjętym założeniem wyeliminowano wszystkie przebiegi, w których kolumna ABC ma znak ujemny. Warto podkreślić, że niektóre kolumny w matrycy nie są unikatowe – pary kolumn mają identyczny rozkład znaków plus i minus, co świadczy o występowaniu aliasów. Przykładowo kolumna A jest identyczna z kolumną BC, analogicznie $B = AC$ oraz $C = AB$.

Opierając się na powyższych ustaleniach, wartość efektu głównego czynnika A w eksperymencie frakcjonowanym oblicza się analogicznie jak efekt interakcji BC.

$$E_A \text{ oraz } E_{BC} = \frac{89 + 67}{2} - \frac{70 + 15}{2} = 78 - 42,5 = 35,5 \quad (32)$$

Obliczona wartość efektu głównego A oraz efektu interakcji BC wynosi 35,5.

Struktura aliasów w analizowanym eksperymencie frakcjonowanym:

$$[A] = A + BC$$

$$[B] = B + AC$$

$$[C] = C + AB$$

W rezultacie nie jest możliwe oddzielne oszacowanie wartości efektu głównego danego czynnika od odpowiadającej mu interakcji dwuczynnikowej.

W pełnym eksperymencie czynnikowym wartości efektu głównego A (29) oraz interakcji BC (31) wynoszą odpowiednio 4 i 31,5. Porównując je z wynikami eksperymentu frakcjonowanego (32), gdzie uwzględniamy aliasy, otrzymujemy wartość 35,5. W konsekwencji w eksperymencie frakcjonowanym nie możemy jednoznacznie stwierdzić, czy obserwowany efekt jest potęgowany wynikiem działania czynnika A, czy interakcji BC.

Zjawisko aliasingu efektów jest szczególnie niebezpieczne w kontekście efektu głównego uwikłanego z interakcją dwuczynnikową. Niebezpieczeństwo wynika głównie z wysokiego prawdopodobieństwa wystąpienia interakcji dwuczynnikowych, co może skutkować błędnym wnioskiem, że zmiana w odpowiedzi systemu wynika z wpływu pojedynczego czynnika, podczas gdy kluczowe jest współdziałanie z innym czynnikiem.

Aby zapobiec aliasowaniu i uniknąć niebezpieczeństw wynikających z niedostrzegania interakcji dwuczynnikowych, konieczne jest stosowanie odpowiednio zaprojektowanych planów eksperymentowania. Kluczowe jest utrzymanie odpowiedniego poziomu rozdzielczości, czyli rozdzielczości eksperymentu. Eksperymenty o niskiej rozdzielczości są szczególnie ryzykowne w systemach, w których interakcje są prawdopodobne. Przykład stanowi eksperyment o rozdzielczości III, w którym efekt główny jest uwikłany z interakcją drugiego rzędu ($A = BC$).

Eksperymenty o rozdzielczości V pozwalają na oddzielne traktowanie efektów głównych i interakcji dwuczynnikowych, co umożliwia dokładną analizę wpływu poszczególnych czynników. Rozdzielczość V oznacza, że efekt główny jest uwikłany z interakcją czwartego rzędu ($A = BCDE$), a interakcje drugiego rzędu są uwikłane z interakcjami trzeciego rzędu ($AB = CDE$). W przypadku rozdzielczości IV efekt główny jest uwikłany z interakcją trzeciego rzędu ($A = BCD$), a interakcje drugiego rzędu są uwikłane z innymi interakcjami drugiego rzędu ($AB = CD$).

W tabeli 2.9 przedstawiono poziomy rozdzielczości oraz strukturę aliasów w eksperymentach frakcjonowanych, w których liczba przebiegów odpowiada połowie pełnego eksperymentu.

Tabela 2.9. Poziomy rozdzielczości oraz struktura aliasów w eksperymentach frakcjonowanych, w których liczba przebiegów odpowiada połowie pełnego eksperymentu

Liczba czynników	Rezolucja	Układ eksperymentu	Generator	Struktura aliasów
3	III	2_{III}^{3-1}	ABC	Efekt główny z interakcją 2. rzędu
4	IV	2_{IV}^{4-1}	ABCD	Efekt główny z interakcją 3. rzędu Interakcja 2. rzędu z inną interakcją 2. rzędu
5	V	2_V^{5-1}	ABCDE	Efekt główny z interakcją 4. rzędu Interakcja 2. rzędu z interakcją 3. rzędu
6	VI	2_{VI}^{6-1}	ABCDEF	Efekt główny z interakcją 5. rzędu Interakcja 2. rzędu z interakcją 4. rzędu Interakcja 3. rzędu z interakcją 3. rzędu
7	VII	2_{VII}^{7-1}	ABCDEFG	Efekt główny z interakcją 6. rzędu Interakcja 2. rzędu z interakcją 5. rzędu Interakcja 3. rzędu z interakcją 4. rzędu
8	VIII	2_{VIII}^{8-1}	ABCDEFGH	Efekt główny z interakcją 7. rzędu Interakcja 2. rzędu z interakcją 6. rzędu Interakcja 4. rzędu z inną interakcją 4. rzędu

Źródło: opracowanie własne na podstawie danych wygenerowanych w programie Minitab Statistical Software 22

W tabeli 2.10 zilustrowano zależności między liczbą przebiegów, aliasingiem, rezolucją a kosztami w eksperymentach frakcjonowanych. Zwiększenie liczby przebiegów wiąże się ze wzrostem kosztów, natomiast w miarę wzrostu liczby przebiegów i liczby testowanych czynników aliasing rośnie, podczas gdy rezolucja eksperymentu spada. Z kolei zwiększenie liczby przebiegów przy minimalnej liczbie testowanych czynników skutkuje poprawą rezolucji oraz redukcją aliasingu.

Tabela 2.10. Zależność między liczbą przebiegów, aliasingiem, rozdzielczością a kosztami w eksperymentach frakcjonowanych

		Liczba czynników w eksperymencie						
		3	4	5	6	7	8	9
Liczba przebiegów	4	2_{III}^{3-1}	–	–	–	–	–	–
	8	–	2_{IV}^{4-1}	2_{III}^{5-2}	2_{III}^{6-3}	2_{III}^{7-4}	–	–
	16	–	–	2_V^{5-1}	2_{IV}^{6-2}	2_{IV}^{7-3}	2_{IV}^{8-4}	2_{III}^{9-5}
	32	–	–	–	2_{VI}^{6-1}	2_{IV}^{7-2}	2_{IV}^{8-3}	2_{IV}^{9-4}
	64	–	–	–	–	2_{VII}^{7-1}	2_V^{8-2}	2_{IV}^{9-3}

Wzrost kosztów

Więcej informacji o wpływie efektów głównych i interakcjach

Niższa rozdzielczość, większy aliasing

Źródło: opracowanie własne na podstawie danych wygenerowanych w programie Minitab Statistical Software 22

Podsumowując, wybór między pełnym a ułamkowym eksperymentem zależy od różnych czynników, takich jak liczba badanych zmiennych, dostępność zasobów oraz oczekiwana dokładność wyników. Eksperymenty pełnoczynnikowe są idealne, gdy testowana jest niewielka liczba czynników i wymagane są szczegółowe dane. Natomiast eksperymenty frakcjonowane stanowią praktyczne rozwiązanie dla bardziej złożonych badań, w których dostępność zasobów jest ograniczona, jednak takie podejście wiąże się ze zjawiskiem aliasingu, co może być problematyczne w przypadku eksperymentów o niskiej rozdzielczości.

Należy podkreślić, że interpretacja danych nie może opierać się na ustandaryzowanym podejściu. Każdy proces charakteryzuje się indywidualnymi uwarunkowaniami, a dla pełniejszego zrozumienia ciągu przyczynowo-skutkowego niezbędna jest wiedza w kontekście analizowanego studium przypadku.

2.7. Podsumowanie

1. Statystyczna kontrola procesu stanowi zbiór narzędzi i metod statystycznych używanych w zarządzaniu jakością w celu monitorowania i kontrolowania procesów produkcyjnych. Celem SPC jest stabilizacja procesów oraz ciągłe doskonalenie jakości produktów i usług poprzez identyfikację i eliminację źródeł zmienności.
2. Walter A. Shewhart, uznawany za pioniera SPC, w latach 20. XX wieku wprowadził koncepcję kart kontrolnych. Podkreślił znaczenie rozróżnienia między zmiennością naturalną (wbudowaną w proces) a zmiennością specjalną (wynikającą z przyczyn zewnętrznych), co jest kluczowe dla efektywnego zarządzania procesami.
3. Integracja SPC ze strategiami zarządzania jakością, jak Lean Manufacturing, Six Sigma czy TQM, pozwala na holistyczne podejście do doskonalenia procesów. Umożliwia eliminację marnotrawstw poprzez ciągłe doskonalenie i optymalizację.
4. Narzędzia SPC, jak karty kontrolne (np. $\bar{X}$ -R, IMR), histogramy, diagramy Pareto, wykresy rozrzutu i diagramy Ishikawy, pozwalają organizacjom na monitorowanie wydajności procesów, identyfikację źródeł zmienności oraz podejmowanie decyzji opartych na danych rzeczywistych.
5. Karty kontrolne $\bar{X}$ -R służą do monitorowania stabilności oraz identyfikacji rodzaju zmienności procesu poprzez określenie wartości średnich i rozstępu w zebranych grupach danych.
6. Karty kontrolne IMR wykorzystywane są do monitorowania stabilności oraz identyfikacji rodzaju zmienności w procesie poprzez analizę danych indywidualnych osadzonych w czasie, na podstawie pomiaru wartości indywidualnych i ruchomych rozstępów.
7. Skuteczność stosowania kart kontrolnych $\bar{X}$ -R oraz IMR uwarunkowana jest założeniami statystycznymi, takimi jak normalny rozkład danych.
8. Histogramy wizualizują rozkład danych procesowych, umożliwiając identyfikację trendów oraz analizę kurtozy czy asymetrii. Są jednak wrażliwe na wybór wielkości przedziałów klasowych i mogą nie oddawać pełnej złożoności procesów.
9. Diagram Pareto pozwala na identyfikację i priorytetyzację najważniejszych problemów wpływających na jakość, opierając się na zasadzie, że niewielka liczba przyczyn odpowiada za większość skutków. W ujęciu złożoności procesów może jednak pomijać istotne, lecz mniej widoczne czynniki.

10. Wykresy rozrzutu służą do analizy zależności między dwiema zmiennymi, co pomaga w identyfikacji korelacji i trendów w procesie. Są jednak ograniczone w reprezentacji relacji wielowymiarowych i mogą być trudne do interpretacji przy dużych zbiorach danych.
11. Diagram Ishikawy (przyczynowo-skutkowy) pomaga w systematycznej identyfikacji potencjalnych przyczyn problemów jakościowych, kategoryzując je w strukturalny sposób. Ułatwia to analizę przyczyn źródłowych, choć istnieje ryzyko nadmiernego uproszczenia złożonych zagadnień.
12. Wskaźniki zdolności procesu (C_p , C_{pk} , P_p , P_{pk}) pozwalają na ilościową ocenę jego zdolności do wytwarzania produktów zgodnych z wymaganiami specyfikacji. Ich stosowanie wymaga jednak spełnienia określonych założeń statystycznych – konieczny jest normalny rozkład danych.
13. Rozróżnienie rodzaju zmienności w procesach (naturalnej i specjalnej) jest kluczowe dla skutecznego zarządzania jakością. Niewłaściwa identyfikacja może prowadzić do błędnych decyzji, przeregulowania procesów i zwiększenia ich nieefektywności.
14. Analiza systemu pomiarowego jest niezbędna do zapewnienia dokładności i wiarygodności danych pomiarowych. Poprzez ocenę rozdzielczości, precyzji, dokładności, powtarzalności i stabilności systemu pomiarowego MSA wpływa na jakość gromadzonych danych i podejmowanych decyzji.
15. Mapowanie procesu za pomocą narzędzi takich jak diagramy przepływu, wykresy PERT czy diagramy zależności umożliwia graficzne przedstawienie przepływu pracy. Ułatwia to identyfikację źródeł nieefektywności, wąskich gardeł oraz usprawnienie komunikacji, a także zrozumienie procesów w organizacji.
16. Skuteczność narzędzi SPC zależy od ich właściwego zastosowania, zrozumienia ograniczeń, szkolenia personelu oraz integracji z kulturą organizacyjną nastawioną na jakość i ciągłe doskonalenie. Stanowi to kluczowy element dla osiągnięcia długoterminowego sukcesu.
17. Projektowanie eksperymentów to systematyczne podejście do planowania, przeprowadzania i analizowania eksperymentów, mające na celu maksymalizację uzyskanych informacji o procesie przy minimalnym nakładzie zasobów.
18. Ronald A. Fisher położył fundamenty nowoczesnego DoE, wprowadzając analizę wariancji (ANOVA) i eksperymenty czynnikowe, co zrewolucjonizowało podejście do prowadzenia badań eksperymentalnych.

19. Gen'ichi Taguchi wprowadził innowacyjne metody projektowania eksperymentów, skupiając się na minimalizacji wpływu zmienności i optymalizacji jakości poprzez wykorzystanie macierzy ortogonalnych.
20. Metoda OFAT jest podejściem projektowym, w którym bada się wpływ jednej zmiennej na zmienną odpowiedzi procesu przy jednoczesnym utrzymaniu pozostałych czynników na stałym poziomie. OFAT nie uwzględnia interakcji między czynnikami.
21. Eksperyment pełnoczynnikowy umożliwia badanie wszystkich możliwych kombinacji poziomów czynników, pozwalając na pełne zrozumienie zarówno efektów głównych, jak i interakcji.
22. Eksperymenty frakcjonowane redukują liczbę wymaganych prób poprzez badanie tylko części kombinacji czynników, co jest szczególnie przydatne przy dużej liczbie zmiennych, lecz prowadzi do zjawiska aliasingu, które może okazać się niebezpieczne.
23. Ortogonalność i zbalansowanie w eksperymentach frakcjonowanych są kluczowe dla uzyskania wiarygodnych wyników. Zapewniają one niezależność czynników i równomierną reprezentację poziomów w eksperymencie.
24. Aliasing efektów w eksperymentach frakcjonowanych oznacza, że niektóre efekty są nierozróżnialne od siebie, co utrudnia interpretację wyników i wymaga dokładnego planowania eksperymentu.
25. Zjawisko aliasingu staje się szczególnie problematyczne, gdy efekt główny jest splątany z interakcją drugiego rzędu, co może prowadzić do błędnych wniosków na temat wpływu poszczególnych czynników.
26. Rezolucja eksperymentu określa zdolność do rozdzielenia efektów głównych i interakcji. Wyższa rezolucja pozwala na dokładniejsze oszacowanie wpływu poszczególnych efektów.
27. Wybór odpowiedniej rezolucji w eksperymentach frakcjonowanych jest kluczowy. Eksperymenty o wyższej rezolucji (np. V) pozwalają na rozdzielenie efektów głównych od interakcji niższego rzędu.
28. Porównanie eksperymentów pełnoczynnikowych i frakcjonowanych pokazuje, że wybór metody zależy od liczby czynników w eksperymencie, ale także od dostępnych zasobów oraz potrzeby dokładności. Eksperymenty pełnoczynnikowe są dokładniejsze, frakcjonowane umożliwiają przeprowadzenie eksperymentów przesiewowych przy relatywnie niewielkim zużyciu zasobów.

29. Interpretacja wyników eksperymentów wymaga odpowiedniej wiedzy i zrozumienia kontekstu procesu. Nie można bowiem polegać wyłącznie na danych statystycznych bez uwzględnienia specyfiki badanego systemu.
30. Projektowanie eksperymentów stanowi niezbędne podejście do optymalizacji procesów, redukcji zmienności i poprawy jakości produktów oraz usług, co jest kluczowe w konkurencyjnym środowisku biznesowym.

ROZDZIAŁ 3. INTEGRACJA STATYSTYCZNEJ KONTROLI PROCESU I PROJEKTOWANIA EKSPERYMENTÓW JAKO ADAPTACYJNE PODEJŚCIE DO ZARZĄDZANIA JAKOŚCIĄ

3.1. Integracja SPC i DoE ze strategiami zarządzania jakością w dynamicznych środowiskach produkcyjnych

Integracja SPC i DoE w kontekście dynamicznych środowisk produkcyjnych stanowi adaptacyjny model, który umożliwia równoczesne zarządzanie zmiennością oraz określanie optymalnych parametrów procesowych. Dynamiczny charakter procesów produkcyjnych wymaga wdrożenia elastycznych metod pozwalających na ciągłe monitorowanie i dostosowywanie, co sprawia, że systemy zarządzania jakością charakteryzują się skuteczną reakcją na wahania jakości procesów i produktów oraz na inne czynniki wpływające na realizowane działania. W niniejszym podrozdziale skupiono się na omówieniu modelu integracji statystycznej kontroli procesu i projektowania eksperymentów, podkreślając znaczenie równoczesnych oddziaływań między monitorowaniem a działaniami naprawczymi lub ukierunkowanymi na poprawę efektywności, jako podstawy dynamicznego zarządzania jakością.

Koncepcja elastyczności produkcji odgrywa kluczową rolę w dynamicznych środowiskach, umożliwiając organizacjom dostosowywanie się do zmieniających się warunków. Torres i in. podkreślają, że dynamika środowiska sprzyja eksploracji nowej wiedzy, niezbędnej do utrzymania konkurencyjności organizacji³⁰⁴. W tym kontekście integracja SPC i DoE może być postrzegana jako strategiczny element w zwiększaniu elastyczności produkcji. Bazując na wnioskach płynących z implementacji statystycznej kontroli procesu i projektowania eksperymentów, możliwe jest ciągłe uczenie się i adaptacja.

Ponadto warto zwrócić uwagę na integrację SPC ze strategiami utrzymania ruchu, opisaną przez Yin i in., która podkreśla znaczenie holistycznego podejścia do zarządzania jakością w produkcji. Badania koncentrują się na tym, w jaki sposób zintegrowane strategie monitorowania statystycznej kontroli procesu oraz utrzymania ruchu, wykorzystujące opóźnione monitorowanie, mogą być zastosowane do równoczesnego

³⁰⁴ J.T. Torres [i in.], *Exploitation versus exploration: the influence of manufacturing flexibility and the environment*, „International Journal of Business Environment” 2011, vol. 4, no. 1, s. 92–105.

uwzględnienia zmian jakości i awarii sprzętu, co ostatecznie zwiększa niezawodność systemów produkcyjnych³⁰⁵. Badanie podkreśla zasadność integracji statystycznej kontroli procesu nie tylko z projektowaniem eksperymentu, ale również z innymi strategiami w obszarze funkcjonowania przedsiębiorstwa.

Strategie utrzymania ruchu oparte na kontroli stanu technicznego infrastruktury zaproponowane przez Du i in. są również zgodne z modelem integracji SPC i DoE³⁰⁶. Wykorzystując wykresy SPC do monitorowania stanu sprzętu, organizacje mogą wdrażać działania konserwacyjne oparte na danych w czasie rzeczywistym, zmniejszając w ten sposób przestoje i zwiększając ogólną niezawodność procesu. To proaktywne podejście do konserwacji uzupełnia eksperymentalny charakter DoE, umożliwiając organizacjom optymalizację zarówno jakości, jak też wydajności operacyjnej. Zastosowanie modelu integracji statystycznej kontroli procesu z projektowaniem eksperymentu pozwala na holistyczne podejście do optymalizacji procesów, jednocześnie zapewniając, że zarządzanie jakością nie jest traktowane w oderwaniu od szerszej strategii operacyjnej, lecz jako jej część.

Rola operacyjnej zdolności absorpcyjnej oraz umiejętności jednoczesnego eksplorowania nowych rozwiązań i doskonalenia istniejących procesów w zwiększaniu elastyczności produkcji została dodatkowo podkreślona w badaniach Patela i in. Wyniki wskazują, że firmy potrafiące równocześnie rozwijać nowe praktyki i optymalizować już istniejące są lepiej przygotowane do wdrażania praktyk produkcyjnych opartych na czasie, co stanowi o istocie integracji oraz rozwoju SPC i DoE. Umożliwia to organizacjom skuteczne reagowanie na dane i podejmowanie świadomych decyzji dotyczących dostosowań procesów³⁰⁷.

Warto również opisać zmianę strategii polegającą na przejściu od perspektywy zorientowanej na produkt w kierunku tej skoncentrowanej na rozwiązaniach produkcyjnych. Wymaga to zastosowania modelu adaptacyjnego, który dostosowuje się do zmieniających się warunków procesowych. Yang i in. wskazują, że zasoby produkcyjne charakteryzują się dużą zmiennością, co wymaga elastycznego podejścia

³⁰⁵ H. Yin [i in.], *An integrated model of statistical process control and maintenance based on the delayed monitoring*, „Reliability Engineering & System Safety” 2015, vol. 133, s. 323–333.

³⁰⁶ X. Du, J. Gai, C. Chen, *Condition-Based Maintenance Optimization for Motorized Spindles Integrating Proportional Hazard Model with SPC Charts*, „Mathematical Problems in Engineering” 2020, vol. 2020, no. 1, s. 1–11.

³⁰⁷ P.C. Patel, S. Terjesen, D. Li, *Enhancing effects of manufacturing flexibility through operational absorptive capacity and operational ambidexterity*, „Journal of Operations Management” 2012, vol. 30, no. 3, s. 201–220.

w obszarze zarządzania produkcją³⁰⁸. Integracja SPC i DoE może ułatwić to przejście, umożliwiając organizacjom monitorowanie jakości usług i przeprowadzanie eksperymentów, które doskonały ich ofertę na podstawie opinii klientów i zmieniających się warunków rynkowych.

Należy podkreślić konieczność ewolucji systemów zarządzania jakością dla zapewnienia nieustannego rozwoju przedsiębiorstw produkcyjnych. Yao wskazuje na potrzebę wzmocnienia oraz rozwoju systemów zarządzania jakością w celu zwiększenia wydajności operacyjnej³⁰⁹. Integracja SPC i DoE służy wówczas jako ramy ciągłego doskonalenia, umożliwiające organizacjom systematyczną ocenę oraz doskonalenie praktyk zarządzania jakością w odpowiedzi na dynamikę środowisk produkcyjnych. W miarę wzrostu złożoności środowisk produkcyjnych potrzeba adaptacyjnych metod planowania staje się oczywista. Varela i in. zwracają uwagę na znaczenie dynamicznego planowania w sieciowych środowiskach produkcyjnych, gdzie procesy muszą dostosowywać się do zmieniających się warunków w czasie rzeczywistym³¹⁰. Zastosowanie statystycznej kontroli procesu i projektowania eksperymentów może zwiększyć szybkość reakcji operacji produkcyjnych, umożliwiając organizacjom szybkie reagowanie na wahania procesów. Na uwagę zasługuje także rola eksploracji procesów w doskonaleniu praktyk SPC. Dogan i Hiziroglu proponują innowacyjne podejście, które łączy SPC z technikami eksploracji procesów w celu usprawnienia produkcji³¹¹. Taka integracja prowadzi do głębszego wglądu w wydajność procesów, umożliwiając organizacjom identyfikację obszarów wymagających poprawy i projektowanie ukierunkowanych eksperymentów, które synergicznie wpływają na poprawę jakości.

Nieustanny rozwój związany z Przemysłem 4.0 sprawia, że zapotrzebowanie na adaptacyjne i inteligentne rozwiązania jest jeszcze bardziej wyraźne. Ivanov i in. podkreślają zasadność integracji produkcji w chmurze i inteligentnych technologii, co pozwala na większą widoczność i kontrolę nad procesami produkcyjnymi³¹².

³⁰⁸ Q. Yang, J. Liu, K. Yang, *Modelling of cross organizational manufacturing resource service chain based on service supply-demand dynamic matching network*, „MATEC Web of Conferences” 2019, vol. 277, 01005.

³⁰⁹ Y.C. Yao, *Research on effectiveness evaluation method and application of quality management system of manufacturing enterprise based on interval-valued hesitation fuzzy set*, „Vibroengineering Procedia” 2017, vol. 14, s. 294–299.

³¹⁰ M.L.R. Varela [i in.], *Collaborative Framework for Dynamic Scheduling Supporting in Networked Manufacturing Environments*, „International Journal of Web Portals” 2014, vol. 6, no. 3, s. 33–51.

³¹¹ O. Dogan, O. Areta Hiziroglu, *Empowering Manufacturing Environments with Process Mining-Based Statistical Process Control*, „Machines” 2024, vol. 12, no. 6, 411.

³¹² D. Ivanov, B. Sokolov, A. Dolgui, *Introduction to Scheduling in Industry 4.0 and Cloud Manufacturing Systems*, „Scheduling in Industry 4.0 and Cloud Manufacturing” 2020, vol. 289, s. 1–9.

Wykorzystując platformy oparte na chmurze, producenci mogą uzyskać dostęp do danych i analiz w czasie rzeczywistym, co umożliwia im skuteczniejsze wdrażanie strategii SPC i DoE. Równoległe ich zastosowanie nie tylko zwiększa wydajność operacyjną, ale także wspiera współpracę między różnymi zakładami produkcyjnymi, promując bardziej zintegrowane podejście do zarządzania jakością.

Model integracji statystycznej kontroli procesu i projektowania eksperymentów musi uwzględniać dynamiczny charakter środowisk produkcyjnych, co wiąże się z koniecznością włączenia modeli cyfrowych pozwalających na symulowanie i optymalizację procesów w czasie rzeczywistym. Kompleksowe podejście do modeli cyfrowych umożliwia wirtualną reprezentację systemów produkcyjnych, ułatwiając dynamiczne symulacje i podejmowanie decyzji³¹³. Integracja danych procesowych pochodzących ze statystycznej kontroli procesu oraz projektowania eksperymentów w czasie rzeczywistym pozwala na stworzenie pętli sprzężenia zwrotnego, która umożliwia stałe doskonalenie procesów oraz poprawę jakości. Takie podejście jest zgodne z zasadami inteligentnej produkcji, w której decyzje podejmowane są na podstawie danych.

Integracja SPC z DoE umożliwia jednocześnie uwzględnienie aspektów zrównoważonego rozwoju. Wzrost znaczenia troski o środowisko sprawia, że producenci coraz częściej szukają sposobów minimalizacji odpadów poprzez optymalne wykorzystanie zasobów. Integracja umożliwia identyfikację metod zmniejszenia zużycia energii oraz redukcję odpadów materiałowych podczas produkcji³¹⁴. Koncentracja na zrównoważonym rozwoju jest zgodna z szerszymi celami nowoczesnej produkcji, w której wydajność i odpowiedzialność za środowisko są równie ważne³¹⁵.

Integracja SPC i DoE w systemach zarządzania jakością jest kluczowa dla organizacji dążących do spełnienia międzynarodowych standardów, takich jak wymagania normy ISO 9001. Równoczesne zastosowanie statystycznej kontroli procesu i projektowania eksperymentu harmonizuje z zasadami ciągłego doskonalenia oraz zadowolenia klientów, które stanowią fundament ISO 9001, umożliwiając przy tym proaktywną adaptację do dynamicznie zmieniających się warunków procesowych

³¹³ P. Grznár [i in.], *A Comprehensive Digital Model Approach for Adaptive Manufacturing Systems*, „Applied Sciences” 2023, vol. 13, no. 19, 10706.

³¹⁴ T. Bergs [i in.], *Methodology for the identification of alternative manufacturing changes for safety-critical components*, „Production Engineering” 2020, vol. 14, s. 297–307.

³¹⁵ C. Muangmee [i in.], *Green entrepreneurial orientation and green innovation in small and medium-sized enterprises (SMEs)*, „Social Sciences” 2021, vol. 10, no. 4, 136.

i wymagań jakościowych. Norma ISO 9001 podkreśla również znaczenie podejścia procesowego, wspieranego zarówno przez SPC, jak i DoE. W rezultacie ich integracji organizacje mogą identyfikować potencjalne ryzyka i wdrażać działania zapobiegawcze przed pojawieniem się niezgodności, co odpowiada założeniom normy, koncentrującej się na prewencji i zarządzaniu ryzykiem, niezbędnych do osiągnięcia zgodności oraz zwiększenia satysfakcji klientów³¹⁶. Ponadto połączenie narzędzi SPC i DoE pozwala na głębsze zrozumienie procesów, umożliwiając efektywną optymalizację poszczególnych obszarów organizacji.

Poza podnoszeniem jakości i efektywności operacyjnej włączenie SPC i DoE w ramach ISO 9001 może też ułatwić spełnienie wymagań regulacyjnych w różnych sektorach. Na przykład w branżach farmaceutycznej i spożywczej surowe przepisy wymagają rygorystycznych procedur kontroli jakości. Systematyczne podejście gwarantuje, że organizacje mogą udokumentować zgodność z regulacjami poprzez dowody kontroli procesów i inicjatyw doskonalących³¹⁷. Ponadto integracja SPC i DoE z ISO 9001 może prowadzić do poprawy wyników organizacyjnych. Badania pokazują, że firmy skutecznie wdrażające zasady ISO 9001 wraz z solidnymi praktykami jakości – mają tendencję do osiągania lepszych rezultatów operacyjnych, większego zadowolenia klientów oraz korzystniejszych wyników finansowych³¹⁸. Jest to szczególnie istotne w konkurencyjnych branżach, gdzie różnice w jakości mogą znacząco wpływać na pozycję rynkową i rentowność. Wykorzystując zalety SPC i DoE, organizacje mogą nie tylko spełnić, ale nawet przewyższyć wymagania określone w normie ISO 9001, co daje możliwość zdobycia trwałej przewagi konkurencyjnej.

Integracja SPC i DoE w przemyśle motoryzacyjnym ma kluczowe znaczenie dla utrzymania wysokich standardów jakości oraz spełnienia wymagań normy ISO 9001. Knop podkreśla, że zastosowanie narzędzi statystycznej kontroli procesu do monitorowania procesów wytwarzania komponentów samochodowych doprowadziło do znaczącego ograniczenia liczby niezgodnych sztuk, co przyczyniło się do wzrostu

³¹⁶ R.J. Manalansan, *Integrating Strategic Management Elements and Continual Improvement Practices in the ISO 9001 Implementation as Framework for Achieving Organizational Effectiveness*, „Asia Pacific Journal of Academic Research in Business Administration” 2022, vol. 10, no. 2, s. 17–33.

³¹⁷ K. Ruamchat, N. Thawesaengskulthai, C. Pongpanich, *Development of quality management system under ISO 9001: 2015 and Joint Inspection Group (JIG) for aviation fuelling service*, „Management and Production Engineering Review” 2017, vol. 8, no. 3, s. 50–59.

³¹⁸ C. Valmohammadi, M. Kalantari, *The moderating effect of motivations on the relationship between obtaining ISO 9001 certification and organizational performance*, „The TQM Journal” 2015, vol. 27, no. 5, s. 503–518.

ogólnej produktywności³¹⁹. Opisane podejście wpisuje się w ramy ciągłego doskonalenia, które stanowi podstawę ISO 9001.

Również w przemyśle spożywczym integracja SPC i DoE ma istotne znaczenie dla utrzymania odpowiednich standardów jakości. Lim i in. wykazali, że stosując narzędzia SPC, producenci żywności są w stanie kontrolować znaczące parametry procesów, co zapewnia, że wytwarzane produkty spełniają normy bezpieczeństwa i jakości wymagane przez organy regulacyjne³²⁰. Włączając do tego podejścia projektowanie eksperymentów, organizacje mogą optymalizować procesy poprzez identyfikację kluczowych czynników wpływających na efektywność. Równoległa implementacja nie tylko poprawia jakość produktów, ale także wspiera kulturę ciągłego doskonalenia w firmach.

W sektorze opieki zdrowotnej rola SPC i DoE również jest nie do przecenienia. Assareh i in. weryfikują zastosowanie statystycznej kontroli procesu w celu poprawy jakości danych w bazach klinicznych. Przedstawiają przegląd metod statystycznych, takich jak plany akceptacji próbek oraz narzędzi – kart kontrolnych, wskazując na możliwość analizy przyczyn źródłowych jako kluczowy element mechanizmu poprawy jakości danych³²¹. Podobnie jak w przypadku pozostałych sektorów DoE stanowi uzupełnienie dla narzędzi statystycznych wpisujących się w statystyczną kontrolę procesu.

Przemysł farmaceutyczny to kolejny sektor, w którym integracja SPC i DoE odgrywa istotną rolę w aspekcie spełnienia międzynarodowych standardów jakości. Wykorzystanie SPC w monitorowaniu procesów produkcyjnych pomaga firmom farmaceutycznym zachować zgodność z dobrymi praktykami produkcyjnymi (GMP) oraz normami ISO 9001³²². Kharub zwraca uwagę na integrację systemu HACCP ze statystyczną kontrolą procesu w celu poprawy jakości procesów w branży farmaceutycznej. Autor przedstawia studium przypadku, w którym ich równoległe zastosowanie doprowadziło do znaczącego obniżenia wskaźnika niezgodności w procesie produkcji leków³²³.

³¹⁹ K. Knop, *Managing and Improving the Drilling Process of Woodwork Furniture with the Use of SPC Tools*, „Manufacturing Technology” 2021, vol. 21, no. 4, s. 492–501.

³²⁰ S.A.H. Lim [i in.], *Critical observations on the statistical process control implementation in the UK food industry: A survey*, „International Journal of Quality & Reliability Management” 2017, vol. 34, no. 5, s. 684–700.

³²¹ H. Assareh [i in.], *Data quality improvement in clinical databases using statistical quality control: Review and case study*, „Therapeutic Innovation & Regulatory Science” 2013, vol. 47, no. 1, s. 70–81.

³²² M. Kharub, *Integrating the HACCP and SPC for hazard control and process improvement: a case of pharmaceutical industry*, „International Journal of Pharmaceutical and Healthcare Marketing” 2020, vol. 14, no. 4, s. 561–586.

³²³ Tamże.

Innowacyjność organizacji, napędzana implementacją narzędzi SPC i DoE, stanowi kluczowy obszar rozważań. Lopes i in. analizują potencjał integracji systemów zarządzania jakością (ISO 9001) z systemami zarządzania innowacją (ISO 56002). Autorzy podkreślają, że istnieje zestaw praktyk jakościowych sprzyjających tworzeniu i wdrażaniu synergii między systemami. Zauważają jednak, że proces integracji może być ograniczony przez kwestie kosztów i czasu. Ponadto wskazują na potencjalne napięcia między dążeniem do wysokiej efektywności operacyjnej a promowaniem innowacyjności³²⁴. Równoczesna implementacja SPC i DoE może doskonale uzupełnić ich wnioski, tworząc solidną podstawę do inicjowania i rozwijania praktyk innowacyjnych. Ich wdrożenie umożliwia nie tylko monitorowanie i doskonalenie procesów w czasie rzeczywistym, ale także eksperymentalne podejście do optymalizacji, sprawiając, że organizacje mogą zapewnić wysoką jakość, budując jednocześnie warunki sprzyjające eksperymentowaniu i wprowadzaniu innowacji, co jest zgodne z założeniami normy ISO 56002. Lopes i in. zauważają również, że specjaliści ds. jakości często napotykają trudności w łączeniu zarządzania jakością z innowacją. Tymczasem SPC i DoE mogą stanowić niemal kompletną strategię pozwalającą na ciągłe doskonalenie procesów w sposób systematyczny i elastyczny. Ułatwia to zespołom jakości aktywne angażowanie się w inicjatywy innowacyjne³²⁵.

Zintegrowane zarządzanie jakością i innowacją wymaga holistycznego spojrzenia na procesy produkcyjne, a stosowanie SPC i DoE umożliwia analizę procesów zarówno pod kątem efektywności jakościowej, jak i identyfikacji potencjalnych obszarów do wprowadzenia innowacji. Ich równoczesne wykorzystanie może pomóc organizacjom postrzegać jakość nie tylko jako spełnienie norm, ale także jako czynnik napędzający innowacje.

Zależność między praktykami zarządzania jakością a innowacjami organizacyjnymi została szczegółowo omówiona w pracy Lłacha i in., którzy argumentują, że samo zarządzanie jakością może być postrzegane jako forma innowacji organizacyjnej³²⁶. Ta perspektywa podkreśla istotność integracji strategii jakości z inicjatywami innowacyjnymi w celu stworzenia solidnych podstaw dla ciągłego

³²⁴ A.R. Lopes [i in.], *Challenges in the Integration of Quality and Innovation Management Systems*, „Standards” 2022, vol. 2, no. 1, s. 52–65.

³²⁵ Tamże.

³²⁶ J. Llach, M. Fa, F. Marimón, *Relationship between quality-management systems and organizational innovations*, „Human Factors and Ergonomics in Manufacturing & Service Industries” 2010, vol. 21, no. 1, s. 52–66.

doskonalenia. Wykorzystując SPC i DoE, przedsiębiorstwa mogą systematycznie identyfikować obszary wymagające innowacji, zwiększając swoją konkurencyjność w sektorze produkcyjnym. Gao i in. wykazują, że innowacje technologiczne są ściśle powiązane z jakością produktów, a ich poprawa napędza innowacje w łańcuchu wartości produkcji³²⁷. Ponadto nie można pominąć roli zarządzania wiedzą w intensyfikacji zdolności innowacyjnych. Bawa i in. podkreślają, że skuteczne praktyki w tym zakresie mogą znacznie zwiększyć zdolność firmy do innowacji ambidekstrowej, umożliwiając równowagę między eksploracją a eksploatacją nowych pomysłów³²⁸. Integracja zarządzania wiedzą z zarządzaniem jakością jest więc kluczowym elementem dla promowania kultury innowacyjności w przedsiębiorstwach produkcyjnych.

Analizując powyższe wnioski, należy wskazać, że integracja statystycznej kontroli procesu i projektowania eksperymentów stanowi kluczowy element napędzania innowacji w procesach produkcyjnych oraz wytwarzanych produktach. Zintegrowane podejście zwiększa jakość produktów, ale także wspiera kulturę ciągłego doskonalenia i innowacji, a organizacje, które skutecznie integrują praktyki zarządzania jakością ze strategiami innowacji, są lepiej przygotowane do reagowania na potrzeby rynku i osiągania trwałej przewagi konkurencyjnej. Ze względu na fakt, że środowiska produkcyjne nadal ewoluują, potrzeba spójnego i zintegrowanego podejścia do zarządzania jakością i innowacjami będzie coraz bardziej istotna.

Podsumowując, integracja statystycznej kontroli procesu i projektowania eksperymentów stanowi wieloaspektowe podejście do poprawy jakości i wydajności operacyjnej. Wykorzystanie postępów w dziedzinie sztucznej inteligencji, modelowania cyfrowego i systemów wspomagania decyzji umożliwia stworzenie solidnych ram, które skutecznie reagują na złożoność procesów produkcyjnych. Integracja nie tylko ułatwia monitorowanie i eksperymentowanie w czasie rzeczywistym, ale też wspiera kulturę ciągłego doskonalenia i zrównoważonego rozwoju w praktykach produkcyjnych.

3.2. Proaktywne podejście do zarządzania jakością poprzez SPC i DoE

Integracja statystycznej kontroli procesu i projektowania eksperymentów w ramach proaktywnego zarządzania jakością stanowi ważny postęp w dziedzinie zapewniania

³²⁷ X. Gao [i in.], *Technological Innovation, Product Quality and Upgrading of Manufacturing Value Chain: Empirical Evidence from China*, „Sustainability” 2023, vol. 15, no. 9, 7289.

³²⁸ S. Bawa [i in.], *Impact of Knowledge Management on Firms' Innovation Performance*, „Technology and Investment” 2023, vol. 14, no. 4, s. 293–328.

wysokich standardów. Synergia wynikająca z ich równoległej implementacji ma znaczenie predykcyjne w identyfikowaniu problemów jakościowych, zanim się pojawią, umożliwiając tym samym minimalizację ryzyka wystąpienia niezgodności oraz poszukiwanie optymalnych rozwiązań w zakresie parametrów procesów i cech wytwarzanych produktów.

Niniejszy rozdział poświęcony jest możliwościom predykcyjnym modelu – podkreśla jego rolę w identyfikacji niezgodności, nim przekroczą one obszar tolerancji w ujęciu utrzymania odpowiedniego poziomu zdolności procesu. Przenosząc punkt ciężkości z reaktywnego na proaktywne zarządzanie jakością, organizacje mogą nie tylko podnosić ogólną jakość produktów, ale także wspierać kulturę ciągłego doskonalenia i doskonałości operacyjnej.

Proaktywne podejście w zarządzaniu jakością definiuje się jako zdolność do przewidywania problemów jakościowych i zapobiegania im, w przeciwieństwie do podejścia reaktywnego, które przejawia się reagowaniem na problemy dopiero po ich wystąpieniu. Zmiana paradygmatu stanowi ważny element w dynamicznie zmieniającym się środowisku produkcyjnym, gdzie model adaptacyjny współgra ze zwinnością organizacji, umożliwiając skuteczne reagowanie na ewoluujące wymagania rynku.

Proaktywność w kontekście SPC charakteryzuje zdolność do analizy danych procesowych w czasie rzeczywistym, co pozwala na wykrycie nawet niewielkich przesunięć czy zmian w procesie, mogących wskazywać na potencjalne problemy. Przykładowo, karty kontrolne ujawniają trendy w wydajności, które poprzedzają defekty, co daje możliwość wcześniejszego reagowania³²⁹. Predykcyjny charakter SPC polega więc na wczesnym ostrzeganiu o odchyleniach od ustalonych parametrów procesu, ułatwiając podejmowanie działań naprawczych we właściwym czasie.

Projektowanie eksperymentów stanowi znakomite uzupełnienie statystycznej kontroli procesu, umożliwiając systematyczne badanie wpływu wielu zmiennych na wyniki. Poprzez identyfikację znaczących czynników kształtujących jakość i wydajność procesu, analizę interakcji między różnymi zmiennymi procesowymi oraz ustalanie optymalnych parametrów – DoE minimalizuje ryzyko wystąpienia niezgodności, co sprawia, że możliwe jest wdrożenie środków zapobiegawczych eliminujących potencjalne problemy jakościowe przed ich wystąpieniem³³⁰. Podejście oparte na danych

³²⁹ Z. Cai [i in.], *How does the social context fuel the proactive fire? A multilevel review and theoretical synthesis*, „Journal of Organizational Behavior” 2019, vol. 40, no. 2, s. 209–230.

³³⁰ R.F. Gunst, R.L. Mason, *Fractional...*, s. 234–244.

jest zgodne z zasadami dynamicznego zarządzania jakością, które promuje adaptacyjność i szybkie reakcje w praktykach zapewniania jakości³³¹.

Możliwości predykcyjne statystycznej kontroli procesu są zwiększone w połączeniu z planowaniem eksperymentów. Ze względu na fakt, że DoE umożliwia organizacjom eksplorację różnych scenariuszy i określenie najskuteczniejszych parametrów procesu, które stanowią środki zapobiegawcze w celu minimalizacji pojawienia się wad oraz niezgodności, możliwa jest intensyfikacja proaktywnej postawy nie tylko w obszarze poprawy jakości produktu, ale również wspierania kultury ciągłego doskonalenia w organizacjach.

Integracja SPC i DoE umożliwia pełnowymiarową analizę, identyfikując kluczowe czynniki jakości oraz oceniając wpływ wielu zmiennych i ich interakcji na proces. W efekcie możliwe jest dokładne wyznaczenie priorytetów usprawnień, ze skupieniem się na elementach wywierających największy wpływ na wskaźniki jakości, co zapewnia efektywną alokację zasobów do najistotniejszych obszarów.

Dane historyczne procesów odgrywają istotną rolę w efektywnym stosowaniu SPC, dając organizacjom możliwość identyfikacji kluczowych wskaźników wydajności oraz trendów kierujących przyszłymi działaniami doskonalącymi. Perspektywa historyczna zebranych danych pozwala na lepsze zrozumienie zmienności procesów, co prowadzi do bardziej świadomych decyzji dotyczących przyszłych działań. Regularne monitorowanie procesów w czasie rzeczywistym w połączeniu z analizą danych z przeszłości umożliwia dokładniejsze definiowanie limitów kontrolnych i poprawę estymacji zachowania procesów, wspierając tym samym ciągłe doskonalenie, a przy tym pomagając organizacjom utrzymać stabilność procesów i wprowadzać działania korygujące we właściwych momentach³³².

Równoległe zastosowanie SPC i DoE zapewnia solidne ramy proaktywnego zarządzania jakością, pozwalając organizacjom na wykorzystanie wiedzy opartej na danych w procesach decyzyjnych³³³. Jednym z głównych celów takiego podejścia jest zmniejszenie ryzyka wystąpienia defektów. Identyfikując potencjalne problemy jakościowe przed ich wystąpieniem, organizacje redukują prawdopodobieństwo

³³¹ Z. Cai [i in.], *How does the social context...*, s. 209–230.

³³² J. Thor [i in.], *Application of statistical process control in healthcare improvement: systematic review*, „BMJ Quality & Safety” 2007, vol. 16, no. 5, s. 387–399.

³³³ A. Puttikunsakon, S. Boonlua, S. Raksong, *Success Factors on Strategic Quality Management Costing: An Empirical Investigation of ISO 9000 Manufacturing Firms in Thailand*, „Suranaree Journal of Social Science” 2017, vol. 11, no. 2, s. 97–117.

pojawienia się kosztownych wad. Proaktywne działania nie tylko oszczędzają czas i zasoby, ale również zwiększają zadowolenie klientów poprzez konsekwentne dostarczanie produktów o odpowiednich standardach. Z badań przeprowadzonych przez Tse i in. wynika, że organizacje traktujące proaktywne zarządzanie jakością jako priorytet są lepiej przygotowane do reagowania na zmiany regulacyjne oraz wymagania rynku, utrzymując tym samym przewagę konkurencyjną³³⁴.

W kontekście podejścia predykcyjnego oraz zdolności adaptacji do dynamicznie zmieniającego się środowiska duże znaczenie ma ciągłe doskonalenie, a równoległe zastosowanie SPC i DoE wspiera kulturę nieustannego ulepszania, kładąc nacisk na regularną ocenę i optymalizację procesów w organizacjach. To iteracyjne podejście nie tylko podnosi jakość produktu, ale także promuje zaangażowanie i wzmocnienie pozycji pracowników³³⁵. Gdy pracownicy są zaangażowani w proces zarządzania jakością, istnieje większe prawdopodobieństwo identyfikacji potencjalnych problemów i przyczynienia się do ich rozwiązania, co zwiększa ogólną wydajność organizacji, a także potęguje efekt synergii wynikający z integracji SPC i DoE. Należy również przywołać kluczową rolę skutecznego przywództwa oraz struktur organizacyjnych sprzyjających współpracy i komunikacji³³⁶. Badania wykazały, że pozytywne relacje interpersonalne w zespołach mogą wzmacniać proaktywne zachowania w pracy, prowadząc do lepszych wyników jakościowych³³⁷. Implementując kulturę proaktywności, organizacje mogą wykorzystać zbiorową wiedzę swoich pracowników do ciągłego doskonalenia praktyk zarządzania jakością.

Biorąc pod uwagę powyższe argumenty, należy stwierdzić, że proaktywny system zarządzania jakością, który koresponduje z integracją statystycznej kontroli procesu i projektowania eksperymentów, wspiera kulturę ciągłego doskonalenia, w której pracownicy na wszystkich szczeblach są zachęceni do udziału w inicjatywach jakościowych. Ważnym ogniwem są szkolenia, które odgrywają kluczową rolę w warstwie transformacji kulturowej, wyposażając pracowników w umiejętności niezbędne do efektywnego wykorzystania narzędzi. Inwestując w programy szkoleniowe podkreślające znaczenie podejmowania decyzji opartych na danych oraz zasad

³³⁴ Y.K. Tse [i in.], *Managing quality risk in supply chain to drive firm's performance: The roles of control mechanisms*, „Journal of Business Research” 2019, vol. 97, s. 291–303.

³³⁵ T. Khinvasara, S. Ness, A. Shankar, *Leveraging AI for Enhanced Quality Assurance in Medical Device Manufacturing*, „Asian Journal of Research in Computer Science” 2024, vol. 17, no. 6, s. 13–35.

³³⁶ Z. Cai [i in.], *How does the social context...*, s. 209–230.

³³⁷ P. Susomrith, A. Coetzer, *Effects of informal learning on work engagement*, „Personnel Review” 2019, vol. 48, no. 7, s. 1886–1902.

zarządzania jakością, organizacje umożliwiają swoim pracownikom przejęcie odpowiedzialności za procesy jakości. Opisywana przemiana kulturowa nie tylko zwiększa skuteczność praktyk zarządzania jakością, ale także napędza zaangażowanie i motywację wśród poszczególnych członków organizacji.

Ważnym zagadnieniem jest wieloaspektowy wpływ proaktywnego zarządzania jakością na wyniki biznesowe organizacji. Poprzez redukcję kosztów, zwiększenie przychodów, podniesienie satysfakcji klientów oraz wzmocnienie pozycji konkurencyjnej firmy stosujące proaktywne podejście mogą osiągnąć znaczną poprawę ogólnej wydajności. Integracja SPC i DoE z zarządzaniem jakością nie tylko ułatwia osiągnięcie doskonałości operacyjnej, ale także wspiera kulturę innowacji i ciągłego doskonalenia, pozycjonując organizacje na długoterminowy sukces w coraz bardziej konkurencyjnym środowisku.

Proaktywne podejście do zarządzania jakością, prezentowane przez zastosowanie SPC i DoE, może prowadzić do zwiększenia przychodów i poprawy rentowności poprzez redukcję kosztów związanych z występowaniem niezgodności, zanim przekształcą się one w kosztowne działania naprawcze³³⁸. Badania wskazują, że firmy wdrażające takie praktyki często doświadczają pozytywnej korelacji między poprawą jakości a wynikami finansowymi³³⁹. Ponadto proaktywne zarządzanie jakością przyczynia się do budowania odpornej organizacji zdolnej sprostać wahaniom i wyzwaniom rynkowym. Koncentrując się na jakości i ciągłym doskonaleniu, przedsiębiorstwa mogą lepiej przewidywać zmiany w otoczeniu i reagować na nie, zwiększając swoją długoterminową stabilność³⁴⁰.

Pomimo wielu zalet wdrożenia systemu zarządzania jakością opartego na proaktywności wiąże się ono z licznymi wyzwaniami, które organizacje muszą pokonać, aby osiągnąć zamierzone cele jakościowe. Jedną z przeszkód jest opór pracowników, wynikający przede wszystkim z braku zrozumienia lub strachu przed zmianami. Pracownicy często postrzegają nowe inicjatywy jako zagrożenie dla bezpieczeństwa zatrudnienia lub jako dodatkowe obciążenie pracą, co może znacznie utrudnić przyjęcie nowych praktyk, tworząc kulturę sceptycyzmu i niechęci do angażowania się

³³⁸ B. Junquera, V. Barba-Sánchez, *Environmental Proactivity and Firms' Performance: Mediation Effect of Competitive Advantages in Spanish Wineries*, „Sustainability” 2018, vol. 10, no. 70, 2155.

³³⁹ N.A. Torugsa, W. O'Donohue, R. Hecker, *Proactive CSR: An Empirical Analysis of the Role of its Economic, Social and Environmental Dimensions on the Association between Capabilities and Performance*, „Journal of Business Ethics” 2012, vol. 115, no. 2, s. 383–402.

³⁴⁰ H. Brege, *Exploring Proactive Market Strategies: Managing the Market to Create Value*, Linköping University Electronic Press, 2018, s. 1–87.

w systemowe rozwiązania³⁴¹. Aby sprostać tym barierom, organizacje są zobowiązane do wprowadzania kompleksowych programów szkoleniowych, które mają na celu edukowanie pracowników oraz podkreślanie ich roli w procesie zarządzania jakością.

Właściwe wdrożenie adaptacyjnego modelu SPC i DoE w kontekście transformacji kulturowej wymaga wielopoziomowej zmiany organizacyjnej, promującej ukierunkowanie na ciągłe doskonalenie. Bez zmiany kultury organizacyjnej nawet najbardziej zaawansowane strategie zarządzania jakością nie przyniosą oczekiwanych rezultatów³⁴².

Poważnym ograniczeniem w implementacji proaktywnego podejścia poprzez integrację SPC i DoE może być brak odpowiednich danych, brak ich szczegółowości oraz ograniczenia technologiczne w obrębie organizacji. Skuteczne zarządzanie jakością uwzględniające model adaptacyjny opiera się na gromadzeniu i analizie dużych zbiorów informacji w celu monitorowania procesów i identyfikowania obszarów wymagających poprawy. Jednak wiele organizacji zmagą się z niewystarczającą infrastrukturą danych, co prowadzi do podejmowania decyzji na podstawie niekompletnych lub niedokładnych informacji i może być wynikiem przestarzałej technologii, braku integracji między systemami lub niedostatecznej liczby szkoleń w zakresie zarządzania danymi, stanowiąc poważne wyzwanie we wdrażaniu strategii proaktywnych. Aby temu zaradzić, organizacje powinny inwestować w zaawansowane systemy zarządzania jakością, które ułatwiają gromadzenie i analizę danych w czasie rzeczywistym, zapewniając wgląd w wydajność procesów i pomagając zidentyfikować trendy wskazujące na potencjalne problemy z jakością, zanim dojdzie do ich eskalacji³⁴³. Ponadto integracja statystycznej kontroli procesu z ramami zarządzania jakością umożliwia proaktywne monitorowanie i kontrolowanie procesów, zmniejszając zmienność i poprawiając ogólną jakość³⁴⁴.

Implementacja proaktywnego zarządzania jakością w aspekcie globalizacji i rynków międzynarodowych stanowi wyjątkowy zestaw wyzwań, ale także możliwości. W miarę rozszerzania działalności poza granice kraju firmy napotykają różnorodne wymagania, co wymusza odpowiednie dostosowanie podejścia do kontroli jakości. Jednym

³⁴¹ G. Santos [i in.], *New Needed Quality Management Skills for Quality Managers 4.0*, „Sustainability” 2021, vol. 13, no. 11, 6149.

³⁴² F. Talib, Z. Rahman, M.N. Qureshi, *An empirical investigation of relationship between total quality management practices and quality performance in Indian service companies*, „International Journal of Quality & Reliability Management” 2013, vol. 30, no. 3, s. 280–318.

³⁴³ C. Pascu, A. Didu, S. Gheorghe, *Study about the Application...*, s. 169–174.

³⁴⁴ H. Hadiyanto, E. Sitepu, *Statistical Process Control (SPC) Implementation in Manufacturing Industry to Improve Quality Performance: A Prisma Systematic Literature Review and Meta Analysis*, „E3S Web of Conferences” 2023, vol. 426, 01066.

z głównych problemów jest konieczność adaptacji praktyk do odmiennych standardów regulacyjnych, oczekiwań klientów i norm kulturowych w poszczególnych krajach. Taki proces często wymaga znacznych inwestycji w poznanie lokalnych warunków rynkowych oraz w odpowiednią modyfikację systemów jakości. Wdrożenie zintegrowanego modelu SPC i DoE w ramach proaktywnego podejścia pozwala na głębsze zrozumienie procesów, umożliwiając ich sterowanie w kierunku pożądanych cech i parametrów jakościowych, co zmniejsza ryzyko wystąpienia niezgodności.

Podsumowując, integracja statystycznej kontroli procesu i projektowania eksperymentów stanowi kluczowy element proaktywnego zarządzania jakością. Systematyczne monitorowanie i analiza procesów pozwalają organizacjom identyfikować kluczowe czynniki wpływające na jakość, podejmować świadome decyzje oraz promować kulturę ciągłego doskonalenia. Współpraca między zespołami, wspierana danymi historycznymi, a także technikami analitycznymi, zwiększa efektywność w obrębie podejmowanych inicjatyw jakościowych, prowadząc finalnie do podniesienia jakości produktów, minimalizacji niezgodności czy większego zadowolenia klientów, co przekłada się na przewagę konkurencyjną na rynku.

3.3. Synergiczne zastosowanie SPC, DoE i zasady Pareto w optymalizacji procesów

Synergia wynikająca z równoległej implementacji statystycznej kontroli procesu, projektowania eksperymentów oraz zasady Pareto stanowi istotny element zarządzania jakością, oferując kompleksowe podejście do sterowania parametrami procesów i cechami wytwarzanych produktów. Choć SPC, DoE i zasada Pareto jako indywidualne podejścia przyczyniają się do zwiększenia efektywności i wydajności działań, to dopiero ich równoczesna implementacja tworzy efekt synergii³⁴⁵.

SPC wykorzystuje techniki statystyczne do monitorowania i kontrolowania procesów, umożliwiając identyfikację specyficznych zdarzeń. Pozwala także odróżnić zmienność naturalną od specjalnej, co umożliwia organizacjom wykrywanie odchyleń od oczekiwanych wartości i szybkie wdrażanie działań naprawczych³⁴⁶. Projektowanie eksperymentów uzupełnia SPC poprzez systematyczne badanie wpływu wielu

³⁴⁵ E. Forte, E. von Harbou, J. Burger, N. Asprion, M. Bortz, *Optimal Design of Laboratory and Pilot-Plant Experiments Using Multiobjective Optimization*, „Chemie Ingenieur Technik” 2017, vol. 89, no. 5, s. 645–654; B.D. Ketelaere [i in.], *Nonstationarity in statistical process control – issues, cases, ideas*, „Applied Stochastic Models in Business and Industry” 2011, vol. 27, no. 4, s. 367–376; D. Radson, A.H. Boyd, *The Pareto Principle...*, s. 223–229.

³⁴⁶ B.D. Ketelaere [i in.], *Nonstationarity in statistical process control...*, s. 367–376.

zmiennych na wynik procesu, co umożliwia identyfikację optymalnych parametrów operacyjnych i ma kluczowe znaczenie dla podejmowania świadomych decyzji dotyczących dostosowań i ulepszeń³⁴⁷. Dopelnieniem kompleksowego podejścia w zarządzaniu jakością jest zasada Pareto, znana jako reguła 80/20, która zakłada, że niewielka liczba przyczyn (około 20%) odpowiada za znaczną część (około 80%) skutków. Jest ona wykorzystywana w celu ustalenia priorytetów dla kwestii wymagających uwagi w procesie³⁴⁸. Zasada Pareto umożliwia organizacjom skuteczniejszą alokację zasobów, pozwalając na skoncentrowanie wysiłków na najbardziej istotnych obszarach, co przekłada się na poprawę jakości w skali całej organizacji.

Zasada Pareto wprowadza również bardziej ustrukturyzowane podejście do rozwiązywania problemów w ramach statystycznej kontroli procesu. Zastosowanie diagramów Pareto sprawia, że firmy mogą wizualnie przedstawić znaczenie różnych czynników i efektów, co ułatwia ustalanie priorytetów działań w zespole. Wizualizacja danych nie tylko wspomaga podejmowanie decyzji, ale także promuje kulturę ciągłego doskonalenia, zachęcając zespoły do skupienia się w pierwszej kolejności na obszarach o największym znaczeniu³⁴⁹. Właściwa identyfikacja kluczowych kwestii umożliwia wdrożenie ukierunkowanych interwencji, przynoszących znaczące efekty w zakresie poprawy jakości i optymalizacji procesów.

Oprócz usprawnienia alokacji zasobów i rozwiązywania problemów integracja zasady Pareto z analizą danych SPC zwiększa ogólną skuteczność systemów zarządzania jakością. Bommier i Zuber opisują implikacje zasady Pareto w kontekście ekonomicznym, wskazując, że jej zastosowanie może prowadzić do optymalnych wyników przy ograniczonych zasobach³⁵⁰.

Synergia między SPC a zasadą Pareto rozciąga się również na obszar rozwoju kart kontrolnych i innych narzędzi statystycznej kontroli procesu. Włączenie zasady Pareto do projektowania i interpretacji kart kontrolnych przyczynia się do zwiększenia zdolności do wykrywania znaczących zmian w wydajności procesu i reagowania na nie. Dever i in. zauważyli, że SPC może być stosowana w różnych obszarach organizacji poprzez

³⁴⁷ R.F. Gunst, R.L. Mason, *Fractional...*, s. 234–244.

³⁴⁸ D. Radson, A.H. Boyd, *The Pareto Principle...*, s. 223–229.

³⁴⁹ P. Milosavljevic [i in.], *Implementation of quality tools in higher education process*, „International Journal of Continuing Engineering Education and Life Long Learning” 2018, vol. 28, no. 1, s. 24–36.

³⁵⁰ A. Bommier, S. Zuber, *The Pareto principle of optimal inequality*, „International Economic Review” 2012, vol. 53, no. 2, s. 593–608.

skupienie się na najbardziej wpływowych zmiennych zidentyfikowanych na podstawie zasady Pareto³⁵¹. Takie podejście nie tylko zwiększa jej skuteczność, ale także zapewnia, że organizacje pozostają elastyczne w reagowaniu na kwestie jakości.

Podobne wnioski wynikają z zastosowania zasady Pareto w projektowaniu eksperymentów. W kontekście DoE kluczowa jest identyfikacja zmiennych mających decydujący wpływ na wyniki. Badania, które przeprowadzili Wang i in., podkreślają znaczenie zrozumienia i redukcji zmienności w pomiarach eksperymentalnych poprzez nadanie priorytetu określonym zmiennym³⁵². Skupienie się na kluczowych czynnikach może prowadzić do znacznej poprawy wyników przy jednoczesnym zminimalizowaniu niepotrzebnej złożoności, co odpowiada założeniom zasady Pareto.

Zastosowanie zasady Pareto w projektowaniu eksperymentów tworzy zatem wieloaspektowe podejście. Koncentrując się na najbardziej wpływowych zmiennych, możliwe jest zoptymalizowanie działania na podstawie uzyskanych wyników, co ostatecznie przyczynia się do bardziej skutecznych procesów decyzyjnych.

Należy podkreślić rolę synergii między SPC, zasadą Pareto i DoE w ujęciu integralnego modelu ciągłego doskonalenia. Statystyczna kontrola procesu służy do monitorowania i kontrolowania kluczowych wskaźników wydajności (KPI) zidentyfikowanych na podstawie analizy Pareto, podczas gdy projektowanie eksperymentów pozwala testować hipotezy dotyczące usprawnień sugerowanych przez dane pochodzące z SPC. Dodatkowo zasada Pareto może być bezpośrednio zastosowana na etapie projektowania eksperymentów, umożliwiając ukierunkowanie działań na czynniki najbardziej wpływające na proces. Wzajemna integracja zwiększa skuteczność poszczególnych podejść, tworząc pętlę sprzężenia zwrotnego, dzięki której proces doskonalenia uzyskuje informacje umożliwiające skuteczne działanie.

Podobnie jak we wdrażaniu pojedynczych podejść, tak i w przypadku zintegrowanego modelu konieczna jest zmiana kultury organizacyjnej. Zaangażowanie liderów ma niebagatelne znaczenie, gdyż kształtuje kulturę ciągłego doskonalenia. Liderzy są odpowiedzialni za wspieranie środowiska, które traktuje porażkę jako okazję do nauki i ceni decyzje oparte na danych³⁵³. Implementacja programów szkoleniowych

³⁵¹ J. Dever [i in.], *The Applicability of Statistical Process Control to Systems Involving People Processes and Business Rhythms*, „Systems Engineering” 2014, vol. 17, no. 2, s. 193–203.

³⁵² H. Wang [i in.], *Understanding and Reducing the Experimental Variability of In Vitro Plasma Protein Binding Measurements*, „Journal of Pharmaceutical Sciences” 2014, vol. 103, no. 10, s. 3302–3309.

³⁵³ A. Laureani, J. Antony, *Leadership and Lean Six Sigma: a systematic literature review*, „Total Quality Management & Business Excellence” 2017, vol. 30, no. 1–2, s. 53–81.

wyposażających pracowników w umiejętności niezbędne do korzystania z SPC, zrozumienia zasady Pareto i skutecznego stosowania DoE stanowi fundament implementacji tego modelu.

Ponadto integracja SPC z zasadą Pareto i DoE w ramach ciągłego doskonalenia jest zgodna z zasadami Lean Six Sigma. Strategia Lean skupia się na redukcji marnotrawstwa i zwiększeniu wydajności procesu, podczas gdy Six Sigma kładzie nacisk na zmniejszenie zmienności i poprawę ogólnej jakości³⁵⁴. Łącząc oba podejścia, organizacje uzyskują kompleksową strategię poprawy efektywności procesów oraz jakości wytwarzanych produktów czy świadczonych usług.

Praktyczne wdrożenie synergicznego zastosowania SPC, DoE i zasady Pareto odbywa się poprzez szereg uporządkowanych kroków. Organizacje powinny najpierw ustalić, czy dane uzyskiwane w procesie mieszczą się w zakresie tolerancji. Jeśli tak, wystarczające jest jego monitorowanie. W przeciwnym razie konieczna staje się identyfikacja rodzaju problemu i źródeł zmienności. Zasada Pareto wskazuje najbardziej istotne obszary i przyczyny niezgodności, ukierunkowując etap DoE na konkretne działania. Wyniki otrzymane w fazie eksperymentów pokazują, które czynniki najbardziej wpływają na zmienność, a ponowne zastosowanie zasady Pareto pozwala skupić się na najistotniejszych elementach. Ostatecznie, na podstawie uzyskanych wniosków, organizacje powinny wdrożyć inicjatywy usprawniające, nieustannie monitorując rezultaty za pomocą SPC, aby zapewnić trwałą poprawę.

Podsumowując, synergiczne zastosowanie statystycznej kontroli procesu, projektowania eksperymentów i zasady Pareto tworzy solidne ramy dla optymalizacji procesów. Wykorzystując mocne strony każdego podejścia, organizacje mogą osiągnąć znaczną poprawę jakości oraz wydajność procesu w ujęciu całościowym. Wzajemna integracja nie tylko ułatwia głębsze zrozumienie dynamiki procesu, ale także umożliwia ukierunkowane interwencje, które przynoszą znaczące korzyści w zakresie redukcji kosztów i wzrostu zadowolenia klientów.

3.4. Przemysł 4.0: nowoczesne zastosowanie SPC, DoE i zasady Pareto w zarządzaniu jakością

Przemysł 4.0, definiowany jako czwarta rewolucja przemysłowa, reprezentuje transformacyjną zmianę w procesach produkcyjnych i wytwórczych charakteryzującą się

³⁵⁴ Tamże.

integracją zaawansowanych technologii, takich jak Internet rzeczy (*Internet of Things*, IoT), sztuczna inteligencja (*artificial intelligence*, AI), analiza dużych zbiorów danych (*big data analytics*) czy uczenie maszynowe (*machine learning*). Zmiana paradygmatu reprezentowana przez założenia Przemysłu 4.0 ukierunkowana jest na wypracowanie inteligentnych rozwiązań, które zwiększają wydajność operacyjną, elastyczność i produktywność w obrębie realizowanych procesów poprzez wzajemnie połączone systemy i wymianę danych w czasie rzeczywistym³⁵⁵. Koncepcja została spopularyzowana przez Klausa Schwaba, który podkreślił głęboki wpływ technologii w ujęciu Przemysłu 4.0³⁵⁶.

Cyfryzacja procesów produkcyjnych stanowi istotny element Przemysłu 4.0. Wiąże się ona z wykorzystaniem urządzeń tworzących IoT, które są odpowiedzialne za zbieranie i przesyłanie danych z maszyn i linii produkcyjnych, umożliwiając monitorowanie oraz kontrolę parametrów poszczególnych czynników. Zebrane dane mogą być analizowane w celu optymalizacji prowadzonych procesów i ogólnej poprawy jakości produktów. Przykładowo Hermann i in. wskazują na fakt, że w obszarze logistyki firmy coraz częściej implementują technologie wpisane w koncepcję Przemysłu 4.0, co pozwala na usprawnienie łańcuchów dostaw i zwiększenie efektywności na skutek lepszej integracji danych i automatyzacji procesów³⁵⁷.

Ważną cechą Przemysłu 4.0 jest jego zależność od podejmowania decyzji na podstawie danych. Ogromne ilości danych procesowych przetwarzanych przez połączone urządzenia tworzące IoT mogą być wykorzystane do głębszego zrozumienia procesów, preferencji klientów czy trendów rynkowych. Możliwość analizy danych w czasie rzeczywistym ułatwia również prowadzenie konserwacji predykcyjnej, redukując przestoje i związane z nimi koszty³⁵⁸.

Sztuczna inteligencja odgrywa istotną rolę w analizie i interpretacji dużych zbiorów danych generowanych w nowoczesnych środowiskach produkcyjnych. Wdrożenie algorytmów uczenia maszynowego umożliwia organizacjom odkrywanie wzorców i zależności niedostępnych dla tradycyjnych metod analizy. Jak zauważają

³⁵⁵ A. Hariharasudan, S. Kot, *A scoping review on Digital English and Education 4.0 for Industry 4.0*, „Social Sciences” 2018, vol. 7, no. 11, s. 227.

³⁵⁶ R. Ortt, C. Stolwijk, M. Punter, *Implementing Industry 4.0: assessing the current state*, „Journal of Manufacturing Technology Management” 2020, vol. 31, no. 5, s. 825–836.

³⁵⁷ M. Hermann, I. Bücker, B. Otto, *Industrie 4.0 process transformation: findings from a case study in automotive logistics*, „Journal of Manufacturing Technology Management” 2020, vol. 31, no. 5, s. 935–953.

³⁵⁸ A.A. Khan [i in.], *Internet of Things (IoT) security with blockchain technology: A state-of-the-art review*, „IEEE Access” 2022, s. 122679–122695.

Jagatheesaperumal i in., analiza predykcyjna oparta na AI pozwala prognozować awarie sprzętu, optymalizować harmonogramy konserwacji oraz zwiększać efektywność operacyjną³⁵⁹. Zdolność ta jest szczególnie ważna w przemyśle, gdzie nieplanowane przestoje mogą prowadzić do znacznych strat finansowych i zakłóceń w produkcji³⁶⁰. Możliwość identyfikowania problemów, zanim się pojawią, pozwala przedsiębiorstwom na wdrażanie proaktywnych środków, zwiększając ich zdolność reagowania na wyzwania.

Jak zostało podkreślone, pojawienie się Przemysłu 4.0 zrewolucjonizowało praktyki w obszarze zarządzania jakością poprzez integrację wielu narzędzi oraz podejść. Nie można pominąć jego wpływu na model statystycznej kontroli procesu, projektowanie eksperymentów oraz zastosowanie zasady Pareto. Integracja SPC i DoE z wykorzystaniem zasady Pareto może znacznie zwiększyć efektywność systemów zarządzania jakością, przynosząc wartość dodaną w postaci szybszej identyfikacji problemów, skutecznego ustalania priorytetów działań oraz natychmiastowej optymalizacji parametrów procesów. Ta synergia umożliwia organizacjom dynamiczne reagowanie na problemy jakościowe, co przekłada się na poprawę wydajności produkcji.

Jedną z głównych korzyści wynikających z połączenia statystycznej kontroli procesu z technologiami Przemysłu 4.0 jest dokładna identyfikacja problemów jakościowych. SPC – podobnie jak technologie IoT koncepcji Przemysłu 4.0 – wykorzystuje monitorowanie danych w czasie rzeczywistym do wykrywania odchyleń od ustalonych standardów, co pozwala na podjęcie działań korygujących, zanim niezgodności pojawią się w końcowym produkcie. Podejście proaktywne stanowi kluczowy element w środowiskach o wysokiej zmienności, gdzie opóźnienia w reakcji mogą prowadzić do zwiększenia poziomu marnotrawstwa i pogorszenia jakości³⁶¹. Przykładem jest wdrożenie inteligentnych systemów monitorowania procesów w ramach IoT, które zapewniają ciągłą informację zwrotną na temat istotnych parametrów, umożliwiając natychmiastowe działania korygujące oparte na danych w czasie rzeczywistym³⁶².

³⁵⁹ S.K. Jagatheesaperumal [i in.], *The Duo of Artificial Intelligence and Big Data for Industry 4.0: Applications, Techniques, Challenges, and Future Research Directions*, „IEEE Internet of Things Journal” 2021, vol. 9, no. 15, s. 12861–12885.

³⁶⁰ Y. Mizukami, J. Nakano, *International comparison of cross-disciplinary integration in industry 4.0: A co-authorship analysis using academic literature databases*, „PLOS One” 2022, vol. 17, no. 10, e0275306.

³⁶¹ A.K. Adeleke, *Intelligent monitoring system for real-time optimization of ultra-precision manufacturing processes*, „Engineering Science & Technology Journal” 2024, vol. 5, no. 3, s. 803–810.

³⁶² Tamże.

Integracja projektowania eksperymentów z technologiami Przemysłu 4.0 dodatkowo zwiększa możliwości optymalizacji parametrów procesu poprzez wypracowanie najlepszych rozwiązań. DoE oferuje ustrukturyzowane podejście do eksperymentowania z różnymi zmiennymi procesowymi w celu określenia ich wpływu na wyniki jakościowe. W połączeniu z analizą danych w czasie rzeczywistym – przedsiębiorstwa mogą dynamicznie dostosowywać parametry na podstawie bieżących wskaźników wydajności, co daje możliwość szybkiego eksperymentowania i optymalizacji³⁶³. Jest to szczególnie korzystne w złożonych środowiskach produkcyjnych, gdzie tradycyjne metody mogą nie nadążać za dynamicznie zmieniającymi się warunkami. Wykorzystując zaawansowaną analitykę i algorytmy uczenia maszynowego, organizacje są w stanie identyfikować optymalne ustawienia oraz przewidywać potencjalne problemy przed ich intensyfikacją, co umożliwia utrzymanie wysokich standardów jakości w całym procesie produkcyjnym³⁶⁴.

Doskonałym przykładem działania zintegrowanego podejścia modelu DoE, SPC i zasady Pareto jest zbieranie danych procesowych przez czujniki tworzące sieć IoT. W takim układzie statystyczna kontrola procesu odpowiada za ciągłe monitorowanie zmienności. Kolejno – w przypadku wystąpienia odchyleń – zasada Pareto wskazuje, które zmienne są najbardziej istotne dla jakości. Projektowanie eksperymentów pozwala natomiast na szybkie planowanie i wdrażanie działań w obszarze optymalizacji³⁶⁵. Cały system tworzy wówczas pętlę sprzężenia zwrotnego, co daje możliwość przywrócenia stabilności procesu, a także skutecznej poprawy jakości produktu, demonstrując wymierne korzyści w kontekście Przemysłu 4.0.

Cyfrowe bliźniaki (*digital twins*) uzupełniają technologię IoT, wnosząc transformacyjny postęp w dziedzinie Przemysłu 4.0. Wykorzystywane jako wirtualne modele, odzwierciedlają aktualny stan procesów fizycznych w czasie rzeczywistym. Koncepcja cyfrowych bliźniaków integruje różne technologie, aby ułatwić ciągłe monitorowanie i optymalizację systemów produkcyjnych. To pozwala organizacjom symulować, przewidywać i optymalizować operacje, zwiększając tym samym wydajność

³⁶³ M.F.R. Lee, *A Review on Intelligent Control Theory and Applications in Process Optimization and Smart Manufacturing*, „Processes” 2023, vol. 11, no. 11, s. 3171.

³⁶⁴ O. Okuyelu, O. Adaji, *AI-Driven Real-time Quality Monitoring and Process Optimization for Enhanced Manufacturing Performance*, „Journal of Advances in Mathematics and Computer Science” 2024, vol. 39, no. 4, s. 81–89.

³⁶⁵ A.K. Adeleke, *Intelligent monitoring system...*, s. 803–810.

oraz usprawniając procesy decyzyjne w różnych sektorach przemysłu³⁶⁶. Stworzenie cyfrowego odpowiednika fizycznego obiektu lub procesu umożliwia głębsze zrozumienie dynamiki złożonych systemów, co z kolei daje możliwość skutecznej optymalizacji w ramach adaptacyjnego, proaktywnego podejścia³⁶⁷.

Kluczowym zagadnieniem jest integracja cyfrowych bliźniaków ze statystyczną kontrolą procesów oraz projektowaniem eksperymentów. SPC koncentruje się na danych w czasie rzeczywistym, monitorując i kontrolując procesy, aby zapewnić ich funkcjonowanie w określonych granicach zmienności. Implementacja cyfrowych bliźniaków umożliwia organizacjom wykorzystywanie informacji zwrotnych z urządzeń tworzących sieć IoT do natychmiastowego dostosowywania procesów, co zwiększa skuteczność narzędzi statystycznych i podkreśla ich wzajemne znaczenie³⁶⁸. Znaczący wpływ cyfrowych bliźniaków widoczny jest również w DoE, gdzie ich predykcyjne możliwości pozwalają symulować szerokie spektrum scenariuszy i wyników w różnych warunkach eksperymentalnych, umożliwiając podejmowanie świadomych decyzji. Synergia między DoE a SPC stanowi przykład wzajemnie uzupełniającego się modelu w obszarze optymalizacji procesów w nowoczesnych środowiskach produkcyjnych. Włączając w ten model zasadę Pareto równoległe z SPC, DoE oraz cyfrowymi bliźniakami, organizacje mogą zidentyfikować czynniki przyczyniające się do większości nieefektywności lub wad w procesie. Takie ukierunkowane podejście pozwala na efektywniejszą alokację zasobów i opracowanie skuteczniejszych strategii rozwiązywania problemów, prowadząc do poprawy jakości i wydajności³⁶⁹. Powstała pętla sprzężenia zwrotnego, uzupełniana przez technologię IoT, daje możliwość szybkiego wdrażania działań naprawczych, minimalizując przestoje i optymalizując ogólną wydajność operacyjną.

Znaczenie cyfrowych bliźniaków w optymalizacji procesów jest istotne i wykracza poza standardowe monitorowanie. Służą one również jako platforma innowacji i badań. Przykładowo organizacje mogą wykorzystywać cyfrowe bliźniaki do przeprowadzania

³⁶⁶ Y. Lu [i in.], *Digital Twin-driven smart manufacturing: Connotation, reference model, applications and research issues*, „Robotics and Computer-Integrated Manufacturing” 2020, vol. 61, 101837.

³⁶⁷ M. Perno, L. Hvam, *Developing a Framework for Scoping Digital Twins in the Process Manufacturing Industry*, w: *SPS2020, Proceedings of the Swedish Production Symposium, October 7-8, 2020*, 2020, vol. 13, s. 475–486.

³⁶⁸ J.A. Douthwaite [i in.], *A Modular Digital Twinning Framework for Safety Assurance of Collaborative Robotics*, „Frontiers in Robotics and AI” 2021, vol. 8, 758099.

³⁶⁹ E. Mincă [i in.], *Digital Twin for a Multifunctional Technology of Flexible Assembly on a Mechatronics Line with Integrated Robotic Systems and Mobile Visual Sensor – Challenges towards Industry 5.0*, „Sensors” 2022, vol. 22, no. 21, 8153.

wirtualnych symulacji, które byłyby kosztowne lub niepraktyczne w rzeczywistości. Umożliwia to szybkie prototypowanie i testowanie nowych pomysłów, co dynamizuje proces eksploracji oraz usprawnia rozwój produktów³⁷⁰. Ponadto wnioski wyciągnięte z przeprowadzonych symulacji mogą być zastosowane w rzeczywistych implementacjach, wypełniając lukę między modelami teoretycznymi a praktycznym wdrożeniem³⁷¹.

Cyfrowe bliźniaki odgrywają zatem kluczową rolę w optymalizacji procesów w ramach Przemysłu 4.0. Ich zdolność do tworzenia wirtualnych odpowiedników rzeczywistych obiektów lub procesów daje możliwość głębszej analizy, ułatwia eksperymentowanie oraz usprawnia procesy decyzyjne, co podkreśla ich znaczenie w nowoczesnych praktykach zarządzania produkcją i jakością. Integracja cyfrowych bliźniaków ze statystyczną kontrolą procesów, projektowaniem eksperymentów oraz zastosowaniem zasady Pareto pozwala organizacjom osiągać wyższy poziom wydajności i jakości.

Przetwarzanie brzegowe (*edge computing*) odgrywa znaczącą rolę w kształtowaniu krajobrazu Przemysłu 4.0. Wykorzystywane jako rozproszony paradygmat obliczeniowy, przybliża zasoby obliczeniowe do źródła danych, zmniejszając opóźnienia i zużycie przepustowości. Bliskość względem źródła danych pozwala na natychmiastowe przetwarzanie informacji generowanych przez urządzenia IoT, co ma kluczowe znaczenie dla skutecznego wdrażania adaptacyjnego modelu opartego na SPC, DoE i zasadzie Pareto. Ma i in. podkreślają, że przeniesienie części zadań obliczeniowych bliżej źródła danych pozwala zmniejszyć opóźnienia i odciążać sieć, prowadząc do poprawy wydajności procesów produkcyjnych. W rezultacie organizacje mogą szybciej przetwarzać dane i reagować na zmiany w czasie rzeczywistym³⁷². Jest to szczególnie ważne w obszarze zarządzania jakością, ponieważ umożliwia organizacjom bardziej dynamiczne reagowanie na wszelkie odchylenia. Ponadto Sun i in. zwracają uwagę na rolę przetwarzania brzegowego w aplikacjach przemysłowych, które wymagają przetwarzania dużych zbiorów danych generowanych przez urządzenia IoT, dając możliwość monitorowania stanu maszyn i wczesnego wykrywania nieprawidłowości.

³⁷⁰ Z. Mao, V.A. Gonzalez, Y. Zou, *Exploring a Digital Twin Framework for lean management of constraints in construction: A literature review*, „IOP Conference Series: Earth and Environmental Science” 2022, vol. 1101, 082019.

³⁷¹ M. Pysin, A. Lobanov, *Digital Twin is a complex of microservices*, „E3S Web of Conferences” 2023, vol. 458, 09012.

³⁷² S. Ma [i in.], *Privacy-preserving anomaly detection in cloud manufacturing via federated transformer*, „Transactions on Industrial Informatics” 2022, vol. 18, no. 12, s. 8977–8987.

Efektywne zarządzanie zadaniami przetwarzania brzegowego sieci pozwala organizacjom szybciej analizować dane z czujników i przewidywać potencjalne awarie sprzętu poprzez przeprowadzenie konserwacji predykcyjnej, która zmniejsza ryzyko nieplanowanych przestojów i obniża koszty utrzymania³⁷³.

Implementacja przetwarzania brzegowego w zarządzaniu jakością prowadzi do znacznego obniżenia kosztów poprzez zmniejszenie ilości danych przesyłanych i gromadzonych w chmurze. Organizacje są w stanie ograniczyć wydatki ukierunkowane na utrzymanie odpowiedniej przepustowości oraz poprawić ogólną wydajność systemu. Song i in. podkreślają, że przetwarzanie brzegowe może zoptymalizować alokację zasobów i obniżyć koszty operacyjne na skutek przetwarzania danych bliżej źródła³⁷⁴.

Przetwarzanie brzegowe w ramach Przemysłu 4.0 stanowi rewolucyjne podejście w dziedzinie zarządzania jakością. Przetwarzanie danych blisko źródła ich generowania zapewnia organizacjom natychmiastowy i łatwy dostęp do informacji, co umożliwia szybkie reagowanie na zmiany w procesach. Wykorzystując bezpośredni dostęp do danych oraz zaawansowaną analitykę, mogą efektywnie wdrażać statystyczną kontrolę procesów, przeprowadzać skuteczne projektowanie eksperymentów oraz stosować zasadę Pareto w celu doskonalenia strategii zarządzania jakością.

Integracja SPC, DoE i zasady Pareto w ramach Przemysłu 4.0 nie tylko zwiększa wydajność operacyjną, ale także przyczynia się do realizacji celów zrównoważonego rozwoju. Optymalizując procesy i minimalizując ilość odpadów, organizacje zmniejszają swój negatywny wpływ na środowisko³⁷⁵. Integracja technologii wpisanych w Przemysł 4.0 z procesami produkcyjnymi prowadzi do znacznej poprawy efektywności realizowanych procesów. Przykładowo, wykorzystanie czujników IoT na liniach produkcyjnych umożliwia organizacjom gromadzenie i analizowanie danych na temat zużycia energii, pozwalając na ukierunkowane interwencje, które redukują ilość odpadów i poprawiają zrównoważony rozwój³⁷⁶. Należy podkreślić, że postęp technologiczny w implementacji technologii wpisanych w ramy Przemysłu 4.0 przekształca dotychczasowe paradygmaty w obszarze zarządzania jakością.

³⁷³ M. Sun [i in.], *Edge Collaborative Online Task Offloading Method Based on Reinforcement Learning*, „Electronics” 2023, vol. 12, no. 18, 3741.

³⁷⁴ P. Song [i in.], *Resource-Saving Customizable Pipeline Network Architecture for Multi-Signal Processing in Edge Devices*, „Sensors” 2022, vol. 22, no. 15, 5720.

³⁷⁵ A. Kwilinski, *Understanding the nonlinear effect of digital technology development on CO₂ reduction*, „Sustainable Development” 2024, vol. 32, no. 5, s. 5797–5811.

³⁷⁶ G. Beier, S. Niehoff, B. Xue, *More sustainability in Industry through industrial Internet of Things?*, „Applied Sciences” 2018, vol. 8, no. 2, 219.

Należy zwrócić uwagę, że nadejście ery Przemysłu 4.0, charakteryzującej się połączeniem zaawansowanych technologii cyfrowych i automatyzacji, wpłynęło na zmianę kompetencji wymaganych od personelu zarządzającego obszarem jakości w różnych branżach. Dynamiczna implementacja sztucznej inteligencji czy pozostałych technologii sprawia, że rola oraz znaczenie specjalistów ewoluują.

Przyglądając się nieustannemu rozwojowi technologicznemu, należy przeprowadzić dogłębną analizę wpływu transformacji na zestaw umiejętności wymaganych od pracowników zarządzających jakością procesów i produktów, podkreślając potrzebę wdrażania programów szkoleniowych i rozwojowych. Bez spełnienia tych warunków i zrozumienia ich znaczenia implementacja modeli integrujących techniki statystyczne z technologiami Przemysłu 4.0 staje się niemożliwa.

Kluczowym elementem w obszarze automatyzacji i cyfryzacji, mającym bezpośrednie znaczenie dla zarządzania jakością, jest rosnąca zależność od analizy danych. Wymusza to konieczność posiadania umiejętności interpretowania i przetwarzania dużych zbiorów informacji generowanych przez zautomatyzowane systemy. Narahari i in. zwracają uwagę, że od specjalistów ds. jakości oczekuje się wdrażania praktyk opartych na nowoczesnych technologiach, aby sprostać wyzwaniom wynikającym z transformacji cyfrowej³⁷⁷. Zdolność do wyciągania praktycznych wniosków z danych ma kluczowe znaczenie dla poprawy jakości produktów i wydajności operacyjnej, co wymaga ukierunkowanego szkolenia w zakresie ich analizy i interpretacji.

Ponadto integracja narzędzi cyfrowych z systemami zarządzania jakością wiąże się z koniecznością odejścia od tradycyjnych praktyk. Logunova i in. podkreślają znaczenie opracowania zintegrowanych systemów opartych na standardach cyfrowych i technologiach, mających na celu stworzenie jednolitej infrastruktury informacyjnej w sieci korporacyjnej przedsiębiorstwa. Zwracają również uwagę na istotność wprowadzenia nowej kultury opartej na cyfrowym myśleniu, zaangażowaniu personelu oraz inicjatywach związanych z transformacją cyfrową³⁷⁸. Opisane podejście wymaga od pracowników kompetencji umożliwiających sprawne korzystanie z nowych systemów,

³⁷⁷ N.S. Narahari, M.V. Kumar, C.N. Guptha, *Recent Developments in Quality Management in the Era of Digital Transformation – A Review*, „European Journal of Theoretical and Applied Sciences” 2023, vol. 1, no. 3, s. 360–375.

³⁷⁸ I.V. Logunova [i in.], *Modernization of Quality Management System in the Conditions of Digital Transformation of Enterprise*, „Russian Conference on Digital Economy and Knowledge Management” 2020, s. 417–422.

które często obejmują złożone interakcje w ramach różnych platform i stosowanych technologii. Jak podkreślają Kannan i Garad, profesjonaliści w obszarze jakości powinni dysponować odpowiednimi umiejętnościami technicznymi – takimi jak interpretacja dużych zbiorów danych procesowych w celu podejmowania strategicznych decyzji oraz znajomość nowych narzędzi, w tym rzeczywistości rozszerzonej. Zwracają również uwagę na znaczenie świadomości zagrożeń związanych z bezpieczeństwem danych³⁷⁹.

Klein i Todesco analizują kwestię integracji rozwiązań cyfrowych z procesami biznesowymi, wskazując na trudności i ograniczenia. Zwracają również uwagę na znaczenie rozwijania zarówno kompetencji technicznych, jak i interpersonalnych w kontekście transformacji cyfrowej. Podkreślają, że małe i średnie przedsiębiorstwa często napotykają problemy w adaptacji do cyfrowych narzędzi i procesów wynikające z braku odpowiednich kwalifikacji wśród pracowników. Wskazują na konieczność holistycznego podejścia w programach szkoleniowych, które powinny obejmować rozwój zarówno umiejętności technicznych, jak i miękkich, aby przygotować personel do wymagań Przemysłu 4.0³⁸⁰.

Znaczenie ciągłego rozwoju zawodowego jest dodatkowo wzmacniane przez dynamiczne tempo zmian wynikających z rozwijających się technologii. Mayakova omawia zagrożenia i trendy związane z cyfrową transformacją zarządzania jakością, podkreślając wagę nieustannej edukacji w celu dostosowania się do tych zmian. Z tego względu organizacje muszą wdrażać ustrukturyzowane programy rozwojowe, aby zapewnić, że personel sprosta stawianym wymaganiom³⁸¹. Integracja technologii Przemysłu 4.0, takich jak cyfrowe bliźniaki i systemy zarządzania jakością oparte na danych, wymaga kompleksowego podejścia do zrozumienia interakcji między procesem a wytwarzanym produktem. Filz i in. zwracają uwagę na potrzebę przyjęcia holistycznego, wielowymiarowego podejścia do zarządzania jakością, ukierunkowanego na kompleksowe ujęcie procesowe, i odrzucenie podejścia skupiającego się wyłącznie na pojedynczych procesach³⁸². Wskazuje to na konieczność wdrożenia podejścia

³⁷⁹ K.S.P. Kannan, A. Garad, *Competencies of quality professionals in the era of industry 4.0: a case study of electronics manufacturer from Malaysia*, „International Journal of Quality & Reliability Management” 2020, vol. 38, no. 3, s. 839–871.

³⁸⁰ V.B. Klein, J.L. Todesco, *COVID-19 crisis and SMEs responses: The role of digital transformation*, „Knowledge and Process Management” 2021, vol. 28, no. 2, s. 117–133.

³⁸¹ A. Mayakova, *Digital transformation of modern quality management*, „Economic Annals XXI” 2019, vol. 180, no. 11–12, s. 138–145.

³⁸² M.A. Filz, J.P. Bosse, C. Herrmann, *Digitalization platform for data-driven quality management in multi-stage manufacturing systems*, „Journal of Intelligent Manufacturing” 2023, vol. 35, no. 6, s. 2699–2718.

systemowego, które umożliwia zrozumienie wzajemnych interakcji między realizowanymi procesami a wytwarzanymi produktami. Ponadto, aby skutecznie zintegrować narzędzia statystyczne z DoE, zasadą Pareto oraz technologiami Przemysłu 4.0, kluczowe jest podkreślenie roli przywództwa ukierunkowanego na wspieranie ciągłego uczenia się i innowacji. Liderzy są zobowiązani do tworzenia odpowiednich warunków i środowiska, które sprzyjają wdrażaniu nowych rozwiązań i rozwojowi umiejętności³⁸³.

Niewątpliwie ważnym zagadnieniem jest współpraca między jednostkami edukacyjnymi a organizacjami, która odgrywa kluczową rolę w rozwijaniu właściwych kompetencji w zakresie ewoluujących technologii. Jak podkreślili Yurchenko i in., integracja systemów cyfrowych z praktykami zarządzania usprawnia podejmowanie decyzji operacyjnych oraz umożliwia szybszą reakcję na zmiany technologiczne³⁸⁴. Modele oparte na współpracy pomiędzy środowiskiem akademickim a przemysłem zapewniają nieustanny rozwój w zakresie zdobywania nowych kwalifikacji.

Co więcej, rola pracowników w obszarze zarządzania jakością zmienia się, przesuując się od podejścia reaktywnego do proaktywnego. W przeszłości zarządzanie jakością często koncentrowało się na identyfikacji i eliminacji niezgodności dopiero po ich wystąpieniu. Integracja analityki predykcyjnej i technologii Przemysłu 4.0 zapewnia specjalistom narzędzia i techniki umożliwiające przewidywanie potencjalnych problemów z jakością, zanim się one pojawiają. Takie proaktywne podejście wymaga dogłębnego zrozumienia dynamiki procesów oraz zdolności do wdrażania działań zapobiegawczych, które minimalizują ryzyko. Wiąże się to z koniecznością rozwoju krytycznego myślenia oraz umiejętności rozwiązywania problemów.

Podsumowując, integracja SPC, DoE i zasady Pareto w ramach Przemysłu 4.0 stanowi istotny postęp w praktykach zarządzania jakością. Uzyskana synergia umożliwia szybszą identyfikację problemów jakościowych oraz ułatwia skuteczne ustalanie priorytetów działań doskonalących, pozwalając na natychmiastową optymalizację parametrów procesu. Wykorzystując dane w czasie rzeczywistym i zaawansowaną analitykę, organizacje mogą zwiększyć swoją zdolność reagowania na wyzwania związane z jakością, co ostatecznie prowadzi do poprawy wydajności produkcji

³⁸³ Z. Dacko-Pikiewicz, M. Zabolotniaia, Z. Cheng, *Influence of leadership style on employees' innovative activity*, „Polish Journal of Management Studies” 2019, vol. 20, no. 1, s. 478–496.

³⁸⁴ I. Yurchenko, M. Bandurin, I. Bandurina, *Modernization of reclamation agriculture management systems*, „BIO Web of Conferences” 2021, vol. 37, 00026.

i satysfakcji klientów. Cyfryzacja i automatyzacja wymagają od personelu zaawansowanych kompetencji. Przejście w kierunku podejmowania decyzji na podstawie danych, integracja nowoczesnych technologii i potrzeba ciągłego rozwoju zawodowego wymagają kompleksowej rewizji programów szkoleniowych. Organizacje muszą nadać priorytet rozwojowi zarówno umiejętności technicznych, jak i miękkich, wdrażać ciągłe inicjatywy szkoleniowe i wspierać partnerstwa z instytucjami edukacyjnymi, aby zapewnić, że ich pracownicy są przygotowani do rozwoju w dynamicznie zmieniającym się środowisku.

3.5. Podsumowanie

1. Integracja statystycznej kontroli procesu i projektowania eksperymentów w dynamicznych środowiskach produkcyjnych umożliwia kontrolę zmienności oraz optymalizację parametrów procesów, stanowiąc adaptacyjne podejście do zarządzania jakością.
2. Istotną cechą w dynamicznych środowiskach produkcyjnych stanowi adaptacja. Poprzez integrację SPC i DoE możliwe jest zwiększenie zdolności organizacji do dostosowywania się do ewoluujących wymagań i warunków rynkowych z równoczesnym wsparciem ciągłego doskonalenia.
3. Równoległe zastosowanie SPC i DoE pozwala organizacjom na jednoczesne eksplorowanie nowych rozwiązań i doskonalenie istniejących procesów, zwiększając elastyczność produkcji, a także wspierając podejmowanie świadomych decyzji na podstawie danych rzeczywistych.
4. Wdrożenie modeli cyfrowych i symulacji w czasie rzeczywistym w ramach integracji technologii Przemysłu 4.0 wraz z SPC i DoE umożliwia optymalizację procesów, tworząc pętlę sprzężenia zwrotnego dla ciągłego doskonalenia i poprawy jakości.
5. Zmiana strategii zarządzania jakością z reaktywnej na proaktywną opartą na równoległym zastosowaniu SPC i DoE pozwala organizacjom przewidywać problemy jakościowe przed ich wystąpieniem i zapobiegać im.
6. Synergiczne zastosowanie SPC, DoE i zasady Pareto umożliwia efektywną alokację zasobów poprzez koncentrację na kluczowych obszarach, co prowadzi do znaczącej poprawy jakości i wydajności prowadzonych procesów.

7. Zastosowanie zasady Pareto w ramach SPC i DoE ułatwia ustalanie priorytetów działań, wizualizację danych (diagramy Pareto) oraz ukierunkowane interwencje w obszarach o największym znaczeniu dla jakości.
8. Przemysł 4.0, jako czwarta rewolucja przemysłowa, wprowadza zaawansowane technologie takie jak Internet rzeczy, sztuczna inteligencja, analiza dużych zbiorów danych czy uczenie maszynowe, transformując praktyki zarządzania jakością.
9. Cyfryzacja procesów produkcyjnych w ramach Przemysłu 4.0 daje możliwość zbierania i analizy danych w czasie rzeczywistym, zwiększając zdolność organizacji do szybkiego reagowania na problemy jakościowe i do optymalizacji procesów.
10. Wykorzystanie technologii Przemysłu 4.0 w zarządzaniu jakością pozwala na predykcję w obrębie podejmowanych działań, skutkując zwiększeniem efektywności i wydajności procesów.
11. Zastosowanie algorytmów uczenia maszynowego i sztucznej inteligencji w integracji z SPC i DoE zwiększa zdolność organizacji do przewidywania potencjalnych problemów i dynamicznej adaptacji do zmian w procesach, co gwarantuje ciągłą optymalizację oraz podnoszenie standardów jakości.
12. Integracja SPC, DoE i zasady Pareto w ramach Przemysłu 4.0 stanowi znaczący postęp w praktykach zarządzania jakością, umożliwiając organizacjom zwinne reagowanie na wyzwania związane z jakością i utrzymanie przewagi konkurencyjnej na rynku.
13. Kluczowymi elementami skutecznej implementacji zintegrowanego podejścia w ramach integracji SPC, DoE i zasady Pareto wraz z technologiami Przemysłu 4.0 są zaangażowanie kierownictwa, inwestycja w szkolenia pracowników oraz kształtowanie kultury organizacyjnej sprzyjającej innowacjom, ciągłemu doskonaleniu i podejmowaniu decyzji opartych na danych.

ROZDZIAŁ 4. OCENA WPLYWU ZASTOSOWANIA ZASADY PARETO NA OPTIMALIZACJĘ ZARZĄDZANIA JAKOŚCIĄ Z WYKORZYSTANIEM ZINTEGROWANEGO MODELU STATYSTYCZNEJ KONTROLI PROCESU I PROJEKTOWANIA EKSPERYMENTU W ŚWIELE WŁASNYCH BADAŃ EMPIRYCZNYCH

4.1. Problematyka badań

W zbiorach literatury można znaleźć liczne publikacje naukowe oraz badania, które przedstawiają skuteczność statystycznej kontroli procesu i projektowania eksperymentu, wskazując przy tym na korzyści płynące z ich implementacji w różnych branżach oraz środowiskach produkcyjnych³⁸⁵. Podobny stan naukowy przypisany jest zasadzie Pareto – podkreśla się jej znaczenie w efektywnej identyfikacji czynników istotnych dla budowania jakości³⁸⁶.

Obecna literatura naukowa często pomija kompleksową analizę, która łączy opisywane podejścia. Dotychczasowe badania skupiają się na ich odrębnym stosowaniu, co prowadzi do ograniczeń w pełnym zrozumieniu analizy przyczynowo-skutkowej procesów. W zasobach publikacji istnieją nieliczne artykuły, które w sposób bardzo ogólny definiują znaczenie równoległego zastosowania tych podejść, zdawkowo przedstawiając przy tym, w jaki sposób należy interpretować zależności czy wyciągać finalne wnioski³⁸⁷. Dodatkowo wiele z istniejących badań ogranicza się wyłącznie do teoretycznych analiz, nie dostarczając przy tym odniesienia do danych empirycznych z rzeczywistych studiów przypadku.

Zidentyfikowana luka badawcza przesądzająca o charakterze pracy koncentruje się na obszarze metodologicznym. Zastosowanie zasady Pareto w integralnym modelu statystycznej kontroli procesu i projektowania eksperymentu łączy metody wspomagające efektywne zarządzanie jakością. Zasada zakładająca, że 80% efektów pochodzi z 20% przyczyn, umożliwia lepsze ukierunkowanie działań na kluczowe

³⁸⁵ E. Bottani [i in.], *Statistical Process Control...*, s. 1024–1033; P. Qiu, *Statistical Process Control Charts...*, s. 123–138; S.P. Jadhav, S.H. Sawant, *Dry Sliding Behaviour Study...*, s. 452–459.

³⁸⁶ A. Shabrawy, *The Application...*, s. 31–39; D. Radson, A.H. Boyd, *The Pareto Principle...*, s. 223–229.

³⁸⁷ M. Tanco, E. Viles, L. Pozueta, *Are All Designs...*; J. Kechagias, K. Kitsakis, N. Vaxevanidis, *Comparison...*, s. 1–4.

elementy zmienności³⁸⁸. W efekcie identyfikacja najważniejszych czynników wpływających na jakość procesu staje się dokładniejsza.

Zastosowanie opisywanych podejść w jednym modelu pozwala na zrozumienie, które ze składowych budujących zmienność naturalną mają największy wpływ na jakość produktu, i w jaki sposób mogą być one optymalizowane. Nowy model umożliwia jednocześnie prowadzenie eksperymentów oraz monitorowanie przebiegu procesu, co oznacza szybsze i bardziej skuteczne wdrażanie usprawnień i działań korygujących.

Narzędzia wpisane w strukturę metod SPC i DoE wraz z zasadą Pareto obejmują pełnowymiarową analizę danych w zakresie praktycznym, graficznym i ilościowym.

4.2. Przedmiot badania

Przedmiotem niniejszego badania jest ocena skuteczności zarządzania jakością w procesie produkcyjnym poprzez wdrożenie zasady Pareto w zintegrowanym modelu statystycznej kontroli procesu oraz projektowania eksperymentu. Dane wykorzystane w analizie pochodziły bezpośrednio z produkcji farby jednoskładnikowej prowadzonej w dużym przedsiębiorstwie, zgodnie ze zaktualizowanymi kryteriami Komisji Europejskiej, które obejmują zatrudnienie powyżej 250 osób, roczny obrót przekraczający 60 milionów euro lub sumę bilansową powyżej 50 milionów euro³⁸⁹.

Przeprowadzone badania w ujęciu studium przypadku ukierunkowane były na minimalizację zmienności w procesie, w którym istotnym parametrem była lepkość dynamiczna, stanowiąca ważny wskaźnik jakości produktu końcowego. Utrzymanie wartości w określonych granicach specyfikacji było niezbędne do zapewnienia zgodności z przyjętymi wymaganiami.

Lepkość dynamiczna stanowi kluczową właściwość reologiczną farb, wpływającą na ich aplikację oraz stabilność w czasie. Definiowana jest jako opór przepływu, gwarantujący jej skuteczne nakładanie przy użyciu różnych metod – pędzla, wałka czy natrysku³⁹⁰. Nie jest ona właściwością statyczną, bowiem zmienia się w zależności od szybkości ścinania, temperatury i czasu, odzwierciedlając złożone interakcje między składnikami, w tym żywicami, pigmentami i rozpuszczalnikami³⁹¹. Zrozumienie

³⁸⁸ M. Alkiayat, *A Practical Guide...*, s. 83–84.

³⁸⁹ Dyrektywa Delegowana Komisji (UE) 2023/2775...

³⁹⁰ J.M. James, I.W. Taifa, *Quality improvement of long oil alkyd (LOA) resin requirements in the formulation of Hi-gloss paints*, „International Journal of Quality & Reliability Management” 2023, vol. 40, no. 7, s. 1753–1776.

³⁹¹ J. Lisowski, B. Szadkowski, A. Marzec, *Effects of Selected Pigments...*

zależności między poszczególnymi zmiennymi ma zasadnicze znaczenie dla optymalizacji formulacji produktu.

Skład farby odgrywa istotną rolę w kształtowaniu jej właściwości reologicznych. Wprowadzenie do receptury odpowiednich substancji, takich jak zagęstniki lub modyfikatory reologii, wpływa na zachowanie układu przy różnych szybkościach ścinania. Wybór pigmentów i wypełniaczy jest również ważny, gdyż zarówno ich stężenie, jak i rodzaj mogą zmieniać parametry – na przykład wyższe ilości pigmentów zazwyczaj prowadzą do zwiększenia lepkości.

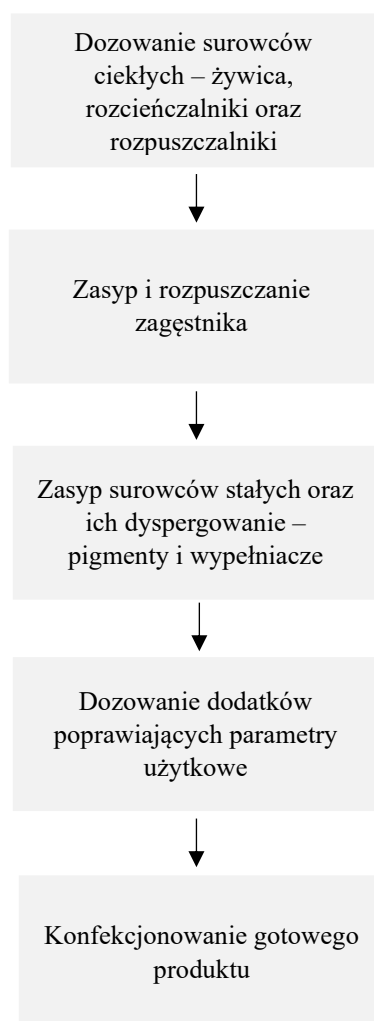
Temperatura stanowi kolejny znaczący czynnik. Wraz z jej wzrostem lepkość większości farb ulega obniżeniu, co ułatwia ich aplikację. Jednak efekt ten może się różnić w zależności od konkretnego składu i obecności określonych dodatków modyfikujących. Dlatego kontrola warunków procesowych, zwłaszcza temperatury, jest ważna dla utrzymania pożądanych poziomów parametru w finalnym produkcie.

Proces produkcji farb jest złożony i składa się z kilku następujących po sobie etapów, z których każdy ma znaczenie dla zapewnienia, że produkt spełnia standardy jakości i sprawdza się w zamierzonych zastosowaniach (rysunek 4.1). Podstawowe składniki – żywice, rozpuszczalniki, rozcieńczalniki, pigmenty oraz dodatki modyfikujące kształtują właściwości farb.

Pierwszy etap produkcji polega na dozowaniu płynnych surowców, takich jak żywice, rozcieńczalniki i rozpuszczalniki. Żywice pełnią rolę spoiwa w recepturach, zapewniając przyczepność, trwałość oraz właściwości błonotwórcze. W analizowanym przypadku formuła opierała się na żywicy alkidowej. Rozpuszczalniki i rozcieńczalniki dodawane są głównie w celu dostosowania lepkości układu. Ponadto wpływają na inne parametry farby, takie jak czas schnięcia, połysk czy ogólna wydajność podczas aplikacji, a także na siłę krycia.

Kolejnym etapem jest dozowanie zagęstnika, który modyfikuje właściwości reologiczne, zwiększając lepkość oraz wpływając na stabilność farby. Zagęstniki odgrywają zasadniczą rolę w zachowaniu układu podczas aplikacji, poprawiając płynięcie i odporność na ściekanie. Substancje te są aktywowane chemicznie – poprzez wprowadzenie określonych komponentów lub fizycznie – poprzez podniesienie temperatury.

Rysunek 4.1. Uproszczony schemat procesu produkcji farby jednoskładnikowej



Źródło: opracowanie własne na podstawie: *Jak powstają farby?*, 2018, Chemia i Biznes, <https://www.chemiaibiznes.com.pl/artykuly/jak-powstaja-farby>, [dostęp: 1 kwietnia 2025]

Po rozpuszczeniu zagęstnika następuje dodanie surowców stałych – pigmentów i wypełniaczy – oraz proces dyspergowania. Pigmenty nadają farbie kolor i krycie, podczas gdy wypełniacze poprawiają właściwości takie jak tekstura i trwałość, stanowiąc jednocześnie ekonomiczne uzupełnienie receptury. Wybór pigmentów i wypełniaczy ma zasadnicze znaczenie, ponieważ wpływa na ostateczny wygląd farby i jej właściwości użytkowe. Pigmenty oraz wypełniacze są dodawane do disolwerów w celu ich zdyspergowania. Disolwery to urządzenia charakteryzujące się możliwością wytwarzania dużych sił ścinających, gwarantujących równomierną dyspersję. Wykorzystują energię mechaniczną do rozbijania skupisk materiałów i równomiernego rozpraszania cząsteczek ciał stałych w całej objętości. Słabo zdyspergowany pigment może prowadzić do problemów powierzchniowych takich jak smużenie, słabe krycie, brak spójności koloru.

Następnym etapem jest dozowanie dodatków wpływających na parametry użytkowe. Mogą one obejmować środki poprawiające rozlewność i płynięcie, stabilizatory UV oraz substancje zwiększające adhezję powłoki. Niezbędne jest ich dokładne dozowanie, ponieważ nawet niewielka niezgodność może spowodować niepożądane efekty, takie jak pogorszenie jakości czy trudności w aplikacji.

Ostatnim krokiem procesu produkcji farby jest konfekcjonowanie gotowego produktu, które obejmuje rozlewanie do wiader, beczek lub specjalnych pojemników. Przed przystąpieniem do konfekcjonowania ważna jest ocena finalnych parametrów. W przypadku farb jednoskładnikowych testy obejmują zazwyczaj pomiary lepkości, gęstości, czasu wysychania, stopnia zdyspergowania układu oraz ściekalności.

W niniejszej pracy wykorzystane zostały metody ilościowe skoncentrowane na zastosowaniu zasady Pareto w obszarze integralnego modelu statystycznej kontroli procesu i projektowania eksperymentu w ujęciu zarządzania jakością. Równoległe zastosowanie metod oraz narzędzi wpisujących się w ich struktury umożliwia monitorowanie, a także optymalizację procesów produkcyjnych w warstwie jakości.

4.3. Ogólne założenia metodyczne pracy doktorskiej

Nadrzędnym celem implementacji integralnego modelu i zasady Pareto jest poprawa jakości oraz ciągłe doskonalenie procesu produkcyjnego. Źródłem danych pierwotnych było studium przypadku, oparte na interpretacji wartości uzyskanych w czasie rzeczywistym. Założeniem realizowanego projektu było właściwe zebranie danych poprzez zaprojektowany eksperyment oraz zrozumienie ciągu przyczynowo-skutkowego, aby określić najbardziej odpowiednie parametry mające wpływ na skuteczne zarządzanie jakością.

Zasada Pareto wyznacza ściśle ramy dla istotności poszczególnych czynników wpływających na jakość analizowanego procesu, umożliwiając priorytetyzację działań naprawczych i optymalizacyjnych poprzez skoncentrowanie się na najważniejszych przyczynach problemów³⁹².

Filarem zarządzania jakością jest monitorowanie, analiza oraz sterowanie procesem produkcyjnym. Zastosowanie zasady Pareto w połączeniu ze statystyczną kontrolą procesu oraz projektowaniem eksperymentu jako komplementarnych podejść stanowi fundamentalny element w utrzymaniu wysokiego poziomu jakości. SPC opiera się

³⁹² A. Shabrawy, *The Application...*, s. 31–39.

głównie na wykorzystaniu kart kontrolnych jako kluczowych narzędzi służących zarówno do monitorowania, jak i usprawniania procesów³⁹³.

DoE obejmuje planowanie oraz przeprowadzenie analiz, aby ułatwić interpretację danych z poszczególnych przebiegów. Istota projektowania eksperymentu polega na manipulowaniu zmiennymi wejściowymi w celu zbadania ich wpływu na zmierzoną zmienną odpowiedzi. Głównym założeniem jest określenie czynników statystycznie istotnych w kontekście zarządzania jakością procesu. W ciągu ostatnich dwudziestu lat znaczenie projektowania eksperymentu jako narzędzia do poprawy jakości i niezawodności produktów znacząco wzrosło³⁹⁴.

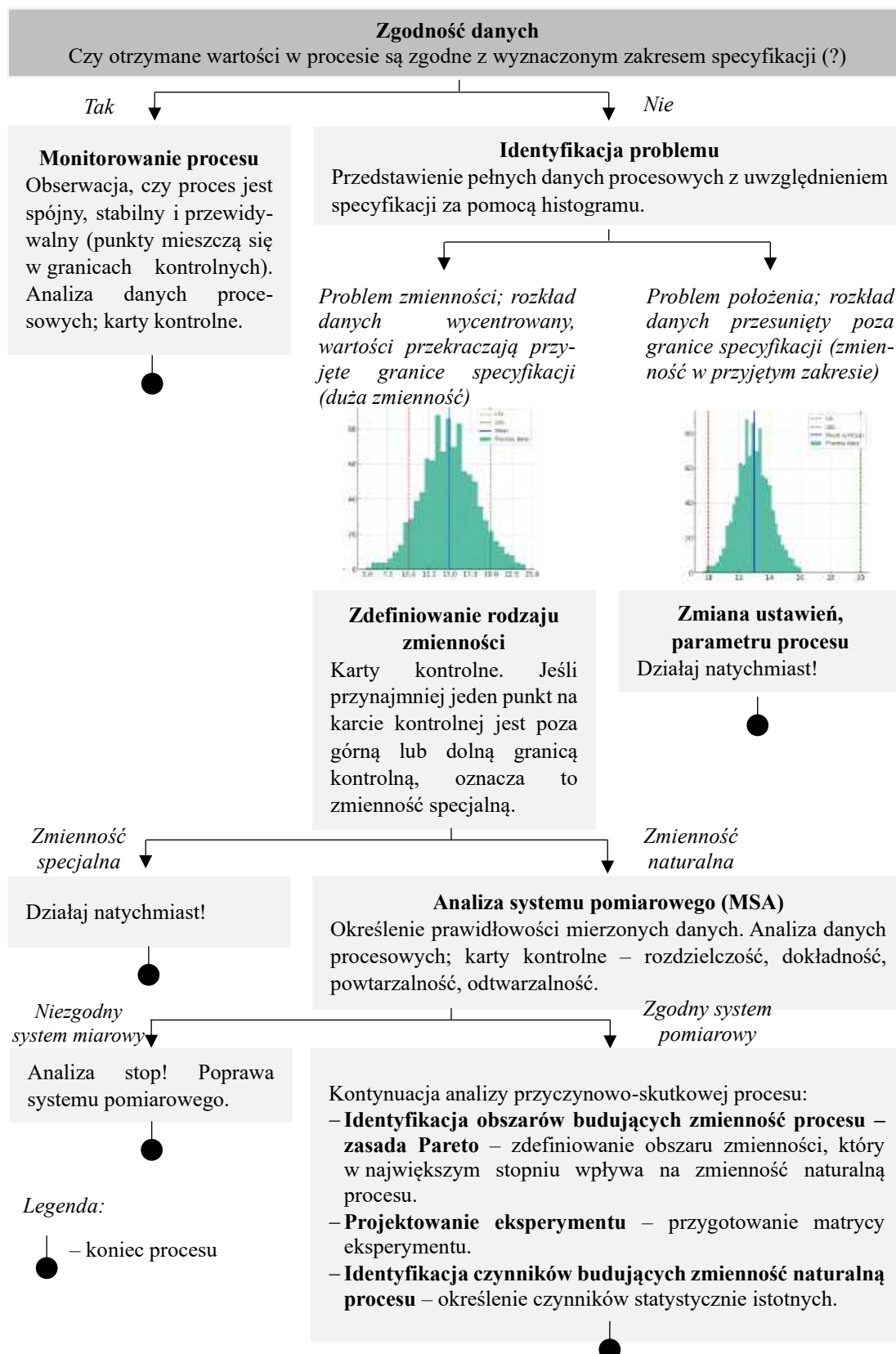
Proponowane podejście, łączące zasadę Pareto z integralnym modelem, nie tylko wzbogaca teoretyczne podstawy zarządzania jakością, ale również ma istotne znaczenie praktyczne, umożliwiając kompleksową kontrolę procesu produkcyjnego (rysunek 4.2).

Etap pierwszy koncentruje się na ocenie zgodności danych – weryfikacji, czy wartości otrzymywane w procesie spełniają przyjętą specyfikację. Na tej podstawie podejmowane są odpowiednie działania – monitorujące lub zapobiegawcze. Do oceny wykorzystuje się karty kontrolne IMR (*individual-moving range chart*), histogramy oraz opcjonalnie wskaźniki zdolności potencjalnej procesu: *process capability* (Cp), *process performance* (Pp) i wskaźniki zdolności rzeczywistej: *process capability index* (Cpk), *process performance index* (Ppk). Każde z narzędzi wspiera dokładną analizę procesu i jego możliwości.

³⁹³ D. Montgomery, C. Borror, *Systems for modern quality...*, s. 343–352.

³⁹⁴ B. Durakovic, H. Basic, *Continuous Quality Improvement in Textile Processing by Statistical Process Control Tools: A Case Study of Medium-Sized Company*, „Periodicals of Engineering and Natural Sciences” 2013, vol. 1, no. 1, s. 39–46.

Rysunek 4.2. Schemat integralnego modelu statystycznej kontroli procesu i projektowania eksperymentu z wykorzystaniem zasady Pareto



Na karcie I (*individual chart*) wyznaczane są dolna (DGK_I) i górna granica kontrolna (GK_I), zgodnie ze wzorami (10) i (11) przedstawionymi w rozdziale 2.2.1 pt. *Karty kontrolne*. Analiza rozkładu danych względem wyznaczonych limitów pozwala na podjęcie właściwych działań. Karta MR (*moving range*) dodatkowo wskazuje, czy zmienność krótkoterminowa procesu jest spójna, stabilna i przewidywalna; granice kontrolne obliczane są za pomocą wzorów (12) i (13)³⁹⁵. Szczegółowy opis rodzajów zmienności znajduje się w rozdziale 2.3 pt. *Rodzaje zmienności w procesach*.

W zależności od uzyskanych wyników etap drugi może obejmować monitorowanie danych w celu oceny ich stabilności (zmienności), gdy uzyskiwane wartości mieszczą się w przyjętym zakresie specyfikacji. Podobnie jak w pierwszym etapie dane procesowe są wówczas kontrolowane za pomocą kart IMR.

W przypadku gdy punkty na karcie I wykraczają poza specyfikację oraz wyznaczone granice kontrolne, konieczna jest dalsza analiza w kierunku zidentyfikowania przyczyny problemu. Istotna jest wówczas równoległa interpretacja rozkładu danych z kartą MR, gdyż wyjście punktów poza limity jest równoznaczne ze zmiennością specjalną³⁹⁶.

Kolejnym krokiem w przypadku zaobserwowania przekroczenia granic kontrolnych jest zdefiniowanie rodzaju problemu. Przedstawienie pełnych danych procesowych za pomocą histogramu umożliwia zobrazowanie ich rozkładu względem specyfikacji. Jeśli rozkład danych jest przesunięty poza przyjęte limity, a zmienność procesu jest niewielka – mieści się w przyjętym zakresie – mamy do czynienia z problemem położenia. Natomiast gdy rozkład danych jest względnie wypośrodkowany, lecz część wartości wykracza poza granice specyfikacji, obserwuje się problem zmienności.

W przypadku wystąpienia problemu położenia działania są mniej złożone. Koncentrują się najczęściej na eliminacji przyczyny zewnętrznej powodującej przesunięcie procesu lub na zmianie jego ustawień czy parametrów.

Gdy występuje problem zmienności, konieczne jest zdefiniowanie jej rodzaju. Podobnie jak w przypadku poprzednich kroków badanie wykorzystuje metodę graficzną – kartę kontrolną MR.

³⁹⁵ P. Qiu, *Statistical Process Control Charts...*, s. 123–138; P. Luangpaiboon, *Weighted Centroid Modified Simplex...*, s. 836–843.

³⁹⁶ X. Lei, C.A. MacKenzie, *Distinguishing between...*

Jeżeli przynajmniej jeden punkt wykracza poza DGK_{MR} lub GGK_{MR} , oznacza to wystąpienie zmienności specjalnej. Aby ją wyeliminować, konieczne jest natychmiastowe działanie. Zmienność specjalna jest zazwyczaj spowodowana przez zewnętrzny czynnik niezwiązany bezpośrednio z procesem. W takim przypadku zrozumienie ciągu przyczynowo-skutkowego, jak dla zmienności naturalnej, może stanowić niepotrzebną stratę zasobów finansowych i czasowych.

Jeśli wszystkie punkty mieszczą się w granicach wyznaczonych przez DGK_{MR} i GGK_{MR} – występuje zmienność naturalna w procesie. W celu jej zminimalizowania konieczne jest poznanie przyczyn źródłowych. Natychmiastowe działania mogą prowadzić do przeregulowania procesu i pogłębienia problemu poprzez zwiększenie zmienności.

Po określeniu rodzaju zmienności niezbędne jest zapewnienie prawidłowego zbierania danych, co wymaga weryfikacji systemu pomiarowego. Każdy pomiar to proces, dlatego należy zbadać, czy jego zmienność jest znacząco mniejsza niż zmienność procesu. Większa zmienność systemu pomiarowego oznacza, że parametry mierzone są w niewłaściwy sposób, co może prowadzić do błędnych wniosków.

Analiza systemu pomiarowego jest wykonywana przy użyciu kart kontrolnych Xbar-R (*mean and range chart*). Karta Xbar wskazuje, czy system pomiarowy jest precyzyjny, czy operatorzy są powtarzalni i odtwarzalni, natomiast karta R informuje o jego rozdzielczości i potencjalnych przyczynach specjalnych³⁹⁷. Wzory wykorzystywane do wyliczenia granic kontrolnych dla Xbar to (1) i (2), natomiast dla karty R – (5), (6) i (7). Szczegółowy opis analizy systemów pomiarowych zawarty został w rozdziale 2.4 pt. *Analiza systemu pomiarowego*.

W przypadku gdy rozdzielczość, powtarzalność, odtwarzalność operatorów w systemie pomiarowym nie są wystarczające, należy przerwać analizę i dokonać poprawy systemu pomiarowego.

Jeśli jednak system pomiarowy jest zgodny, w kolejnym kroku należy zdefiniować obszar, który w największym stopniu wpływa na zmienność naturalną procesu. W tym celu stosuje się analizę ilościową. Ważnym elementem w identyfikacji jest odpowiednie zmapowanie procesu. Kolejno podejmowana jest dalsza analiza: praktyczna (*box plot*), graficzna (karty kontrolne Xbar) i ilościowa (rozkład zmienności). Opiera się ona na

³⁹⁷ M.I. Kovalev, *Measuring Systems Application Analysis...*, s. 732–743; J. Jaworski, R. Kluz, T. Trzepieciński, *Research on Accuracy...*, s. 49–54.

wartościach uzyskanych podczas etapu próbkowania. Warto zaznaczyć, że wymienione metody wzajemnie się uzupełniają, co eliminuje ograniczenia każdej z nich.

Na podstawie zdefiniowanego, dominującego obszaru przeprowadzany jest eksperyment (DoE), mający na celu ocenę czynników wpływających na jego zmienność – tzw. kaskadacja danych³⁹⁸. Istotny jest odpowiedni dobór poziomów testowania. Wyniki DoE pozwalają na identyfikację efektów głównych oraz interakcji między czynnikami, umożliwiając lepsze zrozumienie zależności przyczynowo-skutkowych w procesie.

W kolejnym kroku należy przygotować wykresy rozrzutu oraz szeregi czasowe, aby zobrazować, czy w eksperymencie pojawiły się czynniki zewnętrzne, mogące zafałszować uzyskane wyniki³⁹⁹. Wykresy określają również, czy w obszarze eksperymentu występuje zmienność specjalna. Ważnym elementem jest interpretacja wykresu Pareto dla efektów standaryzowanych, wskazująca główne czynniki oraz interakcje mające zasadniczy wpływ na zmienność. Wykresy efektów głównych pokazują, jak zmiana poziomu testowego wpływa na wartość mierzonego parametru. Efekty główne oraz interakcji obliczane są zgodnie ze wzorami (28) i (30).

W aspekcie eksperymentowania należy podkreślić istotę odpowiedniego zarządzania zakłóceniami. Wprowadzanie właściwych strategii umożliwia wyeliminowanie ryzyka błędnych wyników, co jest niezwykle ważne dla istotności i klarowności uzyskanych wniosków.

4.4. Badania empiryczne

Niniejszy rozdział poświęcono zebraniu i analizie danych w ramach przeprowadzonego studium przypadku. W badaniach zastosowano integralny model statystycznej kontroli procesu oraz projektowania eksperymentu z wykorzystaniem zasady Pareto w celu optymalizacji i poprawy skuteczności zarządzania jakością poprzez zrozumienie ciągu przyczynowo-skutkowego realizowanych działań. Dokonano szczegółowej charakterystyki, poczynając od identyfikacji obszarów generujących zmienność, aż po weryfikację rezultatów uzyskanych w wyniku eksperymentu.

Analiza danych oparta została na programie statystycznym Minitab 21.4.1, pakiecie będącym zbiorem narzędzi stworzonych do przeprowadzania ewaluacji o wysokim stopniu dokładności numerycznej. Obecny trend w rozwoju programów statystycznych

³⁹⁸ H. Rowlands, J. Antony, G. Knowles, *An application...*, s. 78–84.

³⁹⁹ Y.E. Shao, *Recognition of Process Disturbances...*

wskazuje, że pakiet ten stanowi najbardziej znaną aplikację komercyjną w zakresie realizacji projektów Lean Six Sigma⁴⁰⁰.

Dane procesowe wykorzystane w badaniu odzwierciedlały rzeczywistą zmienność produkcji farby jednoskładnikowej. Dogłębna analiza pozwoliła na skuteczne sterowanie procesem w celu maksymalnego zredukowania negatywnego wpływu zmienności na lepkość dynamiczną produktu.

4.4.1. Analiza zgodności danych oraz identyfikacja rodzaju problemu i zmienności

Analiza zgodności danych stanowi istotny element prezentowanego modelu, ponieważ umożliwia określenie rodzaju problemu – położenia czy zmienności – w obrębie badanego przypadku. Dokonuje się jej na podstawie rozkładu wartości przedstawionego za pomocą histogramu, kart kontrolnych (IMR) oraz wskaźników zdolności potencjalnej procesu (C_p , P_p) i zdolności rzeczywistej (C_{pk} , P_{pk})⁴⁰¹. Dodatkowo analiza ta pozwala stwierdzić, czy w zakresie całej historii danych wystąpiła zmienność specjalna, czy proces funkcjonował wyłącznie w granicach zmienności naturalnej. Możliwa jest także ocena rozkładu danych w czasie oraz identyfikacja ewentualnych trendów. W kontekście jakości można przeprowadzić weryfikację zachowania stabilności i przewidywalności procesu produkcyjnego, co przekłada się na utrzymanie powtarzalności wytwarzania produktów. Wczesne wychwycenie potencjalnych odchyłeń pozwala na podjęcie szybkich działań korygujących, ograniczających straty oraz minimalizujących ryzyko pojawienia się niezgodności. W konsekwencji przedsiębiorstwo może nie tylko efektywniej spełniać wymagania klientów i wyznaczone standardy branżowe, ale także utrzymywać przewagę konkurencyjną na rynku⁴⁰².

Na rysunku 4.3 przedstawiono uzyskane wartości historyczne. Dane odzwierciedlały całkowitą zmienność procesu produkcji farby jednoskładnikowej, obejmując 198 wyprodukowanych partii farby w okresie od stycznia 2021 r. do czerwca 2023 r. Pod uwagę wzięto wyniki poprzedzające finalną adjustację poprzez dodanie rozpuszczalnika lub zagęszczenie bazy, w zależności od wyjściowego parametru lepkości. Wartości lepkości dynamicznej oznaczone jako przerywane linie (500 mPa·s

⁴⁰⁰ I. Alagić, *Minitab Application as Statistical Tool for Lean Six Sigma*, w: *International Conference – New Technologies, Development and Applications*, 2021, s. 422–430.

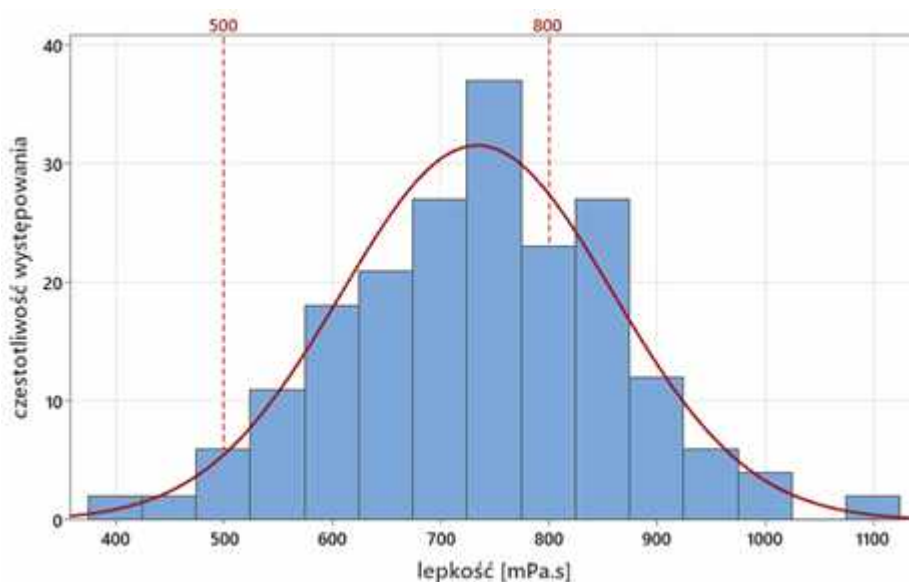
⁴⁰¹ L. Daniels [i in.], *Using Confidence Intervals...*, s. 23–32; M. Mohammed [i in.], *Bristol, Shipman...*, s. 463–467; A.R. Fazeli, E.S. Tashnizi, *Statistical Control...*, s. 260–265.

⁴⁰² J.M. Juran, *Juran on Leadership for Quality...*, s. 17–82.

i 800 mPa·s) reprezentowały przyjętą specyfikację produktu. Należy zauważyć, że znaczna część rezultatów wykraczała poza granice, co świadczyło o dużej zmienności procesu. W kontekście analizy zgodności danych istotne jest, że wartości poza limitami specyfikacji wskazują na konieczność dalszej analizy źródeł zmienności. Z punktu widzenia jakości zbyt duża rozpiętość w obrębie uzyskanych pomiarów stanowi ryzyko niespełnienia wymagań, obniżając przy tym stabilność procesu.

Na podstawie rozkładu danych procesowych stwierdzono występowanie zarówno problemu zmienności – ze względu na duży zakres wyników, znacznie wykraczający poza przyjęty rozkład – jak i położenia. Aby zrozumieć ciąg przyczynowo-skutkowy procesu i skutecznie zmniejszyć jego niestabilność, niezbędne było dokładne przeanalizowanie przyczyn źródłowych.

Rysunek 4.3. Rozkład danych historycznych



Źródło: opracowanie własne przy użyciu programu Minitab Statistical Software 22

Dane przedstawione na histogramie wykazały, że największa częstość obserwacji występowała w przedziale 700–800 mPa·s. Widoczna była niewielka asymetria prawoskośna – ogon rozkładu wydłużył się względem lewej strony, co sugerowało występowanie większej liczby rzadkich, wysokich obserwacji. Rozkład analizowanych wartości odznaczał się kurtozą zbliżoną do rozkładu mezokurtycznego, ze względu na brak wyraźnych szczytów charakterystycznych dla typów leptokurtycznych czy platykurtycznych.

Aby określić, czy analizowane rezultaty charakteryzowały się rozkładem normalnym, konieczne było ustalenie wartości p , która odgrywa kluczową rolę w testowaniu hipotez statystycznych, dostarczając miarę dowodów przeciwko hipotezie zerowej (H_0). W kontekście oceny normalności dystrybucji parametr wskazuje, jak dobrze obserwowane wyniki pasują do modelu teoretycznego. Jeśli wartość p przekracza z góry ustalony poziom istotności (zwykle $\alpha = 0,05$), nie ma podstaw do odrzucenia H_0 , czyli założenia o normalności danych. Natomiast p mniejsze niż α sugeruje znaczące odchylenie, prowadząc do odrzucenia hipotezy⁴⁰³. Ponadto oczekuje się, że zachowanie wartości p przy hipotezie zerowej będzie zgodne z jednolitym rozkładem danych w całym przedziale, co jest niezbędne do walidacji wyników testów normalności⁴⁰⁴. Jeśli wartości są równomiernie rozłożone, oznacza to prawdziwość hipotezy zerowej w testach, potwierdzając wniosek, że dane charakteryzują się rozkładem normalnym.

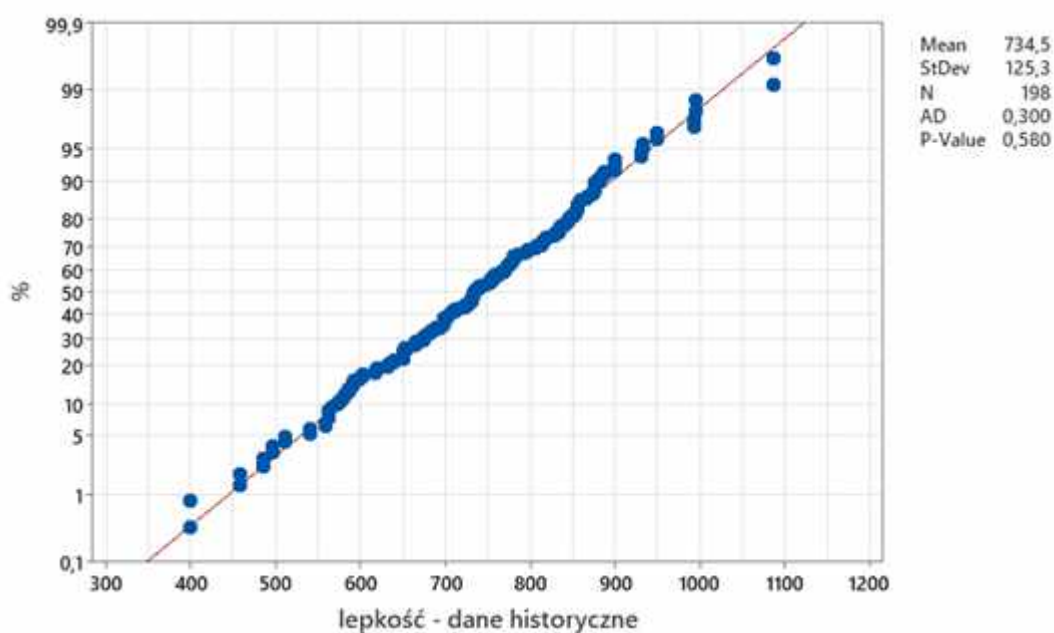
Na rysunku 4.4 przedstawiono wykres prawdopodobieństwa normalnego, służący do wizualnej oceny zgodności danych z rozkładem normalnym. Jeżeli punkty układają się wzdłuż linii prostej, można uznać, że dane spełniają kryteria normalności. Aby potwierdzić ocenę, należało zwrócić uwagę na wartość p uzyskaną w programie Minitab, która wynosiła 0,580, przekraczając poziom istotności $\alpha = 0,05$. Bazując na otrzymanym wyniku, nie było podstaw do odrzucenia hipotezy zerowej o normalności rozkładu, co stanowiło potwierdzenie możliwości wykorzystania kart kontrolnych Shewharta w kontekście dalszej analizy danych.

Istotnym elementem analizy zgodności danych są karty kontrolne wartości indywidualnych oraz ruchomego rozstępu. Umożliwiają one ocenę procesu pod kątem stabilności i wydajności w czasie rzeczywistym. Rysunek 4.5 przedstawia rozkład rezultatów w odniesieniu do granic kontrolnych wyznaczonych na kartach I oraz MR.

⁴⁰³ T. Uhm, S. Yi, *A comparison of normality testing methods by empirical power and distribution of P-values*, „Communications in Statistics-Simulation and Computation” 2023, vol. 52, no. 9, s. 4445–4458.

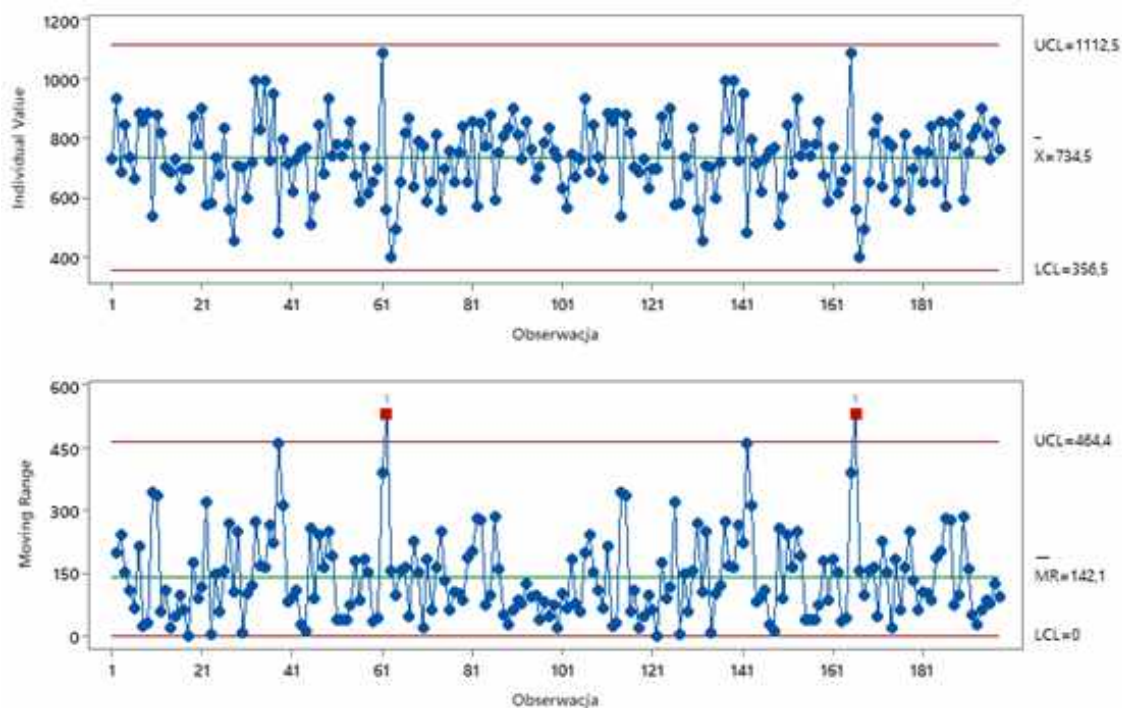
⁴⁰⁴ Y. Taguchi, T. Turki, *Projection in genomic analysis: A theoretical basis to rationalize tensor decomposition and principal component analysis as feature selection tools*, „PLOS One” 2022, vol. 17, no. 9, e0275472.

Rysunek 4.4. Wykres prawdopodobieństwa normalnego



Źródło: opracowanie własne przy użyciu programu Minitab Statistical Software 22

Rysunek 4.5. Karta kontrolna IMR dla analizowanego procesu



Źródło: opracowanie własne przy użyciu programu Minitab Statistical Software 22

Granice kontrolne na karcie I zostały obliczone za pomocą wzorów (10) i (11). W pierwszej kolejności wyliczono średnią arytmetyczną ze wszystkich pomiarów (8). Podstawiając wartości, otrzymano:

$$\bar{I} = \frac{\sum_{i=1}^n I_i}{n} = \frac{731 + 931 + \dots + 765}{198} = 734,5 \quad (33)$$

Średnia wartość ruchomego rozstępu została obliczona na podstawie równania (9).

$$\overline{MR} = \frac{\sum_{i=2}^n (X_i - X_{i-1})}{n-1} = \frac{200 + 242 + \dots + 94}{197} = 142,1 \quad (34)$$

Uzyskane wartości pozwoliły na wyznaczenie górnej i dolnej granicy kontrolnej GGK_I i DGK_I :

$$GGK_I = \bar{I} + 2,66 \cdot \overline{MR} = 734,5 + 2,66 \cdot 142,1 = 1112,5 \quad (35)$$

$$DGK_I = 734,5 - 2,66 \cdot 142,1 = 356,5 \quad (36)$$

Analizując kartę I, należy zaznaczyć, że wszystkie punkty mieściły się w zakresie limitów wyznaczonych przez górną (GGK_I) i dolną granicę kontrolną (DGK_I), co oznaczało wystąpienie zmienności krótkoterminowej ponad zmienność długoterminową. W aspekcie dalszych działań optymalizacyjnych konieczne było podjęcie kroków ukierunkowanych na identyfikację przyczyn źródłowych zmienności w krótkim terminie. Limity kontrolne na karcie I pokazywały, jak duża była rzeczywista zmienność procesu, która wynosiła od 356,5 mPa·s do 1112,5 mPa·s, znacząco przekraczając przyjęte granice specyfikacji określone jako zakres 500–800 mPa·s. W ujęciu jakości tak duży rozrzut otrzymanych wyników, wykraczających poza ustalone granice specyfikacji, oznaczał wytwarzanie produktów niespełniających wymagań. Aby zapewnić trwałą zgodność z zakładanymi parametrami lepkości, należało podjąć działania w zakresie optymalizacji.

Granice kontrolne dla karty MR wyznaczono według równań (12) i (13). W celu obliczenia średniego ruchomego rozstępu $\overline{MR}$ zastosowano wzór (9). Po podstawieniu wartości otrzymano:

$$GGK_{MR} = \overline{MR} \cdot D_4 = 142,1 \cdot 3,267 = 464,2 \quad (37)$$

$$DGK_{MR} = \overline{MR} \cdot D_3 = 142,1 \cdot 0 = 0 \quad (38)$$

Różnica pomiędzy oszacowaną wartością GGK_{MR} a rezultatem pochodzącym z programu Minitab wynikała z przyjętych zaokrągleń. Nie wpłynęła jednak na interpretację danych procesowych w analizowanym studium przypadku.

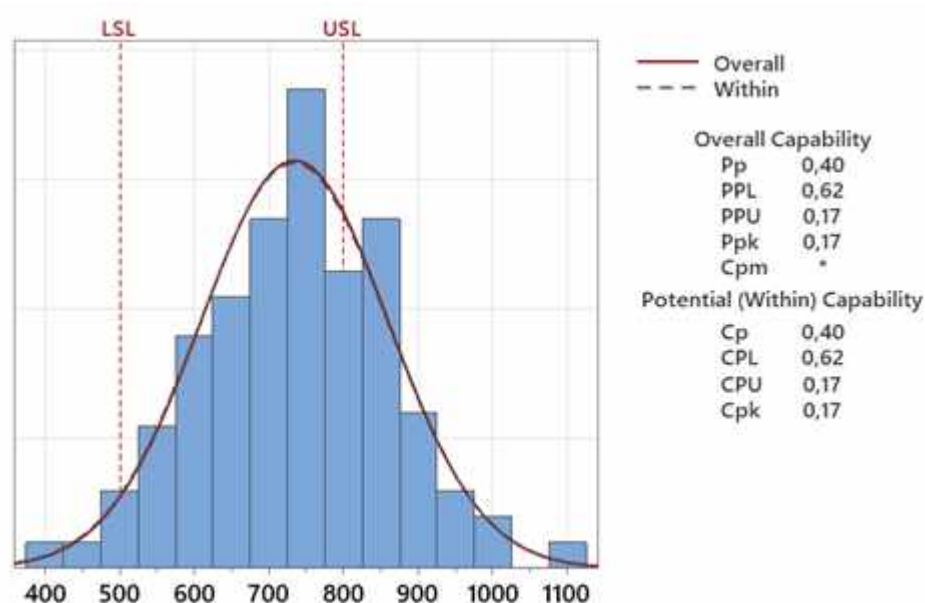
Analizując wartości uzyskane na karcie MR, wskazano, że dwa punkty wykraczały poza górną granicę kontrolną, świadcząc o wystąpieniu zmienności specjalnej⁴⁰⁵.

Wyznaczenie wskaźników zdolności procesu stanowiło uzupełnienie prezentacji rozkładu danych za pomocą histogramu. Ze względu na dysponowanie zbiorem danych obejmującym okres od stycznia 2021 r. do czerwca 2023 r., zawierającym 198 partii i odzwierciedlającym całkowitą zmienność procesu, ryzyko nieuchwycenia rzeczywistej zmienności było pomijalne.

Wskaźniki zdolności procesu określają, w jakim stopniu proces produkcyjny jest zdolny wytwarzać produkty zgodne z ustalonymi specyfikacjami i tolerancjami, co jest istotne dla utrzymania wysokiej jakości wyrobów. Ponadto pozwalają na ocenę wydajności oraz estymację prawdopodobieństwa, że wytworzone produkty spełnią przyjęte wymagania⁴⁰⁶.

Pp i Ppk ukazują historyczne osiągi w obrębie realizowanego procesu, podczas gdy Cp i Cpk świadczą o jego potencjale w przypadku, gdy usunięte zostaną przyczyny specjalne. Na rysunku 4.6 zaprezentowano raport dotyczący zdolności procesowej analizowanego przypadku.

Rysunek 4.6. Raport zdolności procesowej analizowanego przypadku



Źródło: opracowanie własne przy użyciu programu Minitab Statistical Software 22

⁴⁰⁵ X. Lei, C.A. MacKenzie, *Distinguishing between...*

⁴⁰⁶ L. Daniels [i in.], *Using Confidence Intervals...*, s. 23–32.

Uzyskane wartości wskazały, że zarówno dla Cp, jak i Cpk wyniki wynosiły poniżej 0,5, co oznaczało, że proces nie spełniał wymagań specyfikacji. W szczególności zwrócono uwagę na znaczną zmienność oraz przesunięcie rzeczywistej średniej względem wartości docelowej. Wymagane było podjęcie kompleksowych działań optymalizacyjnych poprzez zmniejszenie zmienności oraz dostosowanie średniej wartości w kierunku spełniania norm jakościowych.

W celu obliczenia wskaźników Cp (14) i Cpk (15) oszacowano odchylenie standardowe zgodnie ze wzorem (18), biorąc pod uwagę średnią ruchomego rozstępu oraz stałą d_2 , której wartość dla $n = 2$ wynosiła 1,128. Po podstawieniu danych procesowych otrzymano:

$$\sigma = \frac{\overline{MR}}{d_2} = \frac{142,1}{1,128} = 125,97 \quad (39)$$

$$C_p = \frac{(GGS - DGS)}{6\sigma} = \frac{(800 - 500)}{6 \cdot 125,97} = 0,40 \quad (40)$$

$$C_{pk} = \min\left(\frac{\bar{I} - DGS}{3\sigma}, \frac{GGS - \bar{I}}{3\sigma}\right) = \min\left(\frac{734,5 - 500}{3 \cdot 125,97}, \frac{800 - 734,5}{3 \cdot 125,97}\right) = 0,17 \quad (41)$$

Wskaźniki Pp i Ppk wyznaczono odpowiednio ze wzorów (16) i (17). Aby je obliczyć, konieczne było określenie odchylenia standardowego dla próby na podstawie równania (20). Podstawiając dane:

$$s = \sqrt{\frac{\sum(x_n - \bar{I})^2}{n-1}} = \sqrt{\frac{(731-734,5)^2 + (931-734,5)^2 + \dots + (765-734,5)^2}{197}} = 125,33 \quad (42)$$

$$P_p = \frac{(GGS - DGS)}{6s} = \frac{(800 - 500)}{6 \cdot 125,33} = 0,40 \quad (43)$$

$$P_{pk} = \min\left(\frac{\bar{I} - DGS}{3s}, \frac{GGS - \bar{I}}{3s}\right) = \left(\frac{734,5 - 500}{3 \cdot 125,33}, \frac{800 - 734,5}{3 \cdot 125,33}\right) = 0,17 \quad (44)$$

Ze względu na fakt, że dystrybucja danych w rozkładzie normalnym przesunięta była w prawo względem przyjętego zakresu specyfikacji, jako wartości wskaźników przyjęto rezultaty z kalkulacji $\frac{\bar{I} - LSL}{3\sigma}$ dla Cpk oraz $\frac{\bar{I} - LSL}{3s}$ dla Ppk, które w obu przypadkach wynosiły 0,17.

Podsumowując, w analizowanym przypadku obejmującym 198 pomiarów występował problem zarówno z położeniem, jak i ze zmiennością procesu. Obecność

zmienności specjalnej zazwyczaj skłania do podjęcia natychmiastowych działań, jednak ze względu na fakt związany z przesunięciem procesu oraz szerokim rozkładem priorytetem stało się poznanie ciągu przyczynowo-skutkowego. Impulsywne działania mogły nie przynieść pożądanych rezultatów, ponieważ duża część wyników pomiarów znajdowała się poza wyznaczonymi granicami, budując szeroki zakres zmienności naturalnej. W odniesieniu do wymagań jakościowych taka sytuacja skutkowałą wyrobami, których parametry odbiegały od przyjętych kryteriów. Dlatego niezbędne było szczegółowe rozpoznanie źródeł i mechanizmów odchyleń, aby przywrócić stabilność procesu oraz zminimalizować zmienność uzyskiwanych rezultatów.

W kontekście przeprowadzonej analizy zgodności danych należy podkreślić, że przedstawione narzędzia wzajemnie się uzupełniały. Wykorzystanie histogramu do prezentacji danych procesowych pozwala całościowo spojrzeć na ich dystrybucję, podczas gdy karty kontrolne wskazują odchylenia procesu oraz występowanie zmienności specjalnej. Wskaźniki zdolności ukazują zarówno przesunięcie procesu, jak i potencjał po wyeliminowaniu przyczyn specjalnych. Każde z zastosowanych narzędzi ma swoje ograniczenia, opisane we wcześniejszych podrozdziałach, dlatego istotne było ich równoległe zastosowanie.

4.4.2. Analiza systemu pomiarowego

Analiza systemu pomiarowego odgrywa istotną rolę w aspekcie stosowania prezentowanego modelu. Pozwala stwierdzić, czy dane procesowe są zbierane we właściwy sposób⁴⁰⁷. Z tego powodu przed przystąpieniem do identyfikacji obszaru dominującego w kreowaniu zmienności naturalnej niezbędna była ocena systemu pomiarowego. Dogłębny opis MSA zawarty został w rozdziale 2.4. *Analiza systemu pomiarowego*.

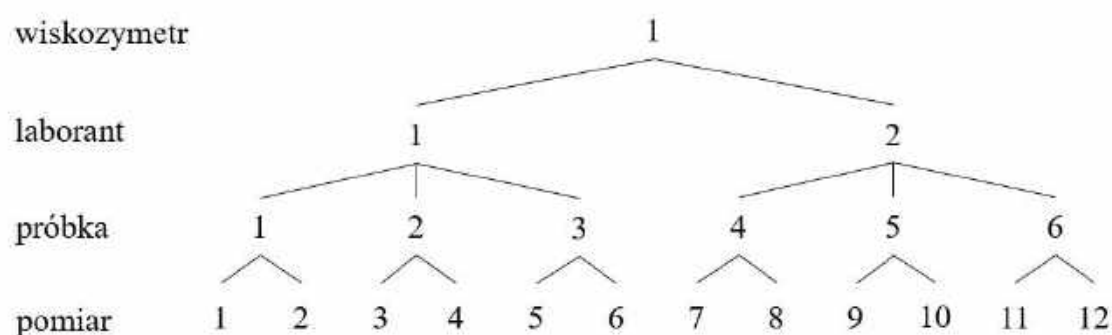
Uznając lepkość dynamiczną za kluczowy parametr w ocenie jakościowej analizowanego procesu, konieczne było opracowanie jednolitego standardu procedury pomiarowej. Badania prowadzono przy użyciu wiskozymetru Brookfield DV-E. Przed rozpoczęciem każdego testu próbki były termostatowane do temperatury $23^{\circ}\text{C} \pm 0,5^{\circ}\text{C}$. Pomiar lepkości dynamicznej odbywał się z wykorzystaniem wrzecion sp3 lub sp4, w zależności od wartości mierzonego parametru, co wpływało na obciążenie sprężyny. Procedurę przeprowadzano dla ugięcia w zakresie od 20% do 80%. Jeśli wartości

⁴⁰⁷ A. Yadav, *Measurement Systems Analysis...*, s. 123–127.

uzyskane dla wrzeciona sp3 nie mieściły się w wymaganym przedziale, zastępowano je wrzecionem sp4. Badania wykonywano bezpośrednio w puszkach o pojemności 1 litra. Wyniki lepkości rejestrowane były po 30 sekundach od uruchomienia stopera i stabilizacji wskazań urządzenia.

Analiza systemu pomiarowego w ujęciu opisywanego studium przypadku przeprowadzona została na podstawie poniższej matrycy – rysunek 4.7.

Rysunek 4.7. Struktura drzewa próbkowania – analiza systemu pomiarowego



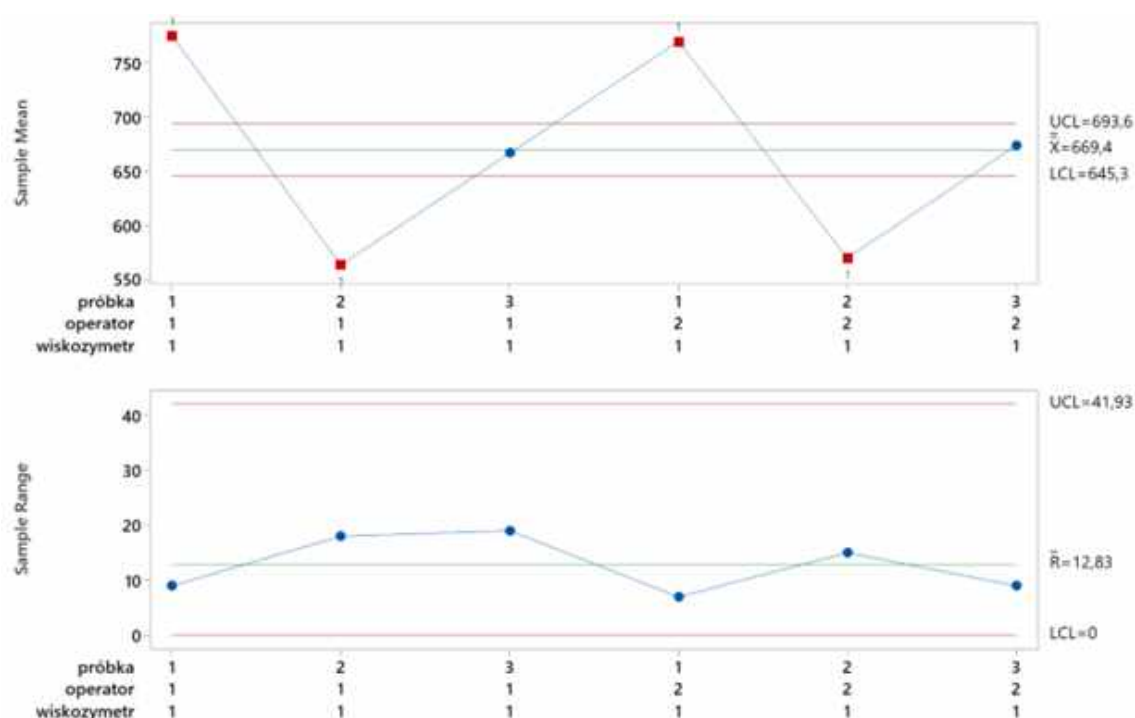
Źródło: opracowanie własne przy użyciu rzeczywistych danych procesowych

Do badań wykorzystano jedno urządzenie pomiarowe. W eksperymencie uczestniczyło dwóch laborantów, z których każdy testował te same trzy próbki. Każda z nich była mierzona dwukrotnie, przy czym druga seria pomiarów została przeprowadzona kolejnego dnia. Próbki zostały zakodowane za pomocą przypisanych cyfr, a laboranci nie znali systemu kodowania, co zapewniało obiektywność pomiarów.

Do kompleksowego określenia charakterystyk systemu pomiarowego użyto kart kontrolnych $\bar{X}$ -R. Na podstawie danych zebranych podczas próbkowania wygenerowano odpowiednie wykresy, przedstawione na rysunku 4.8.

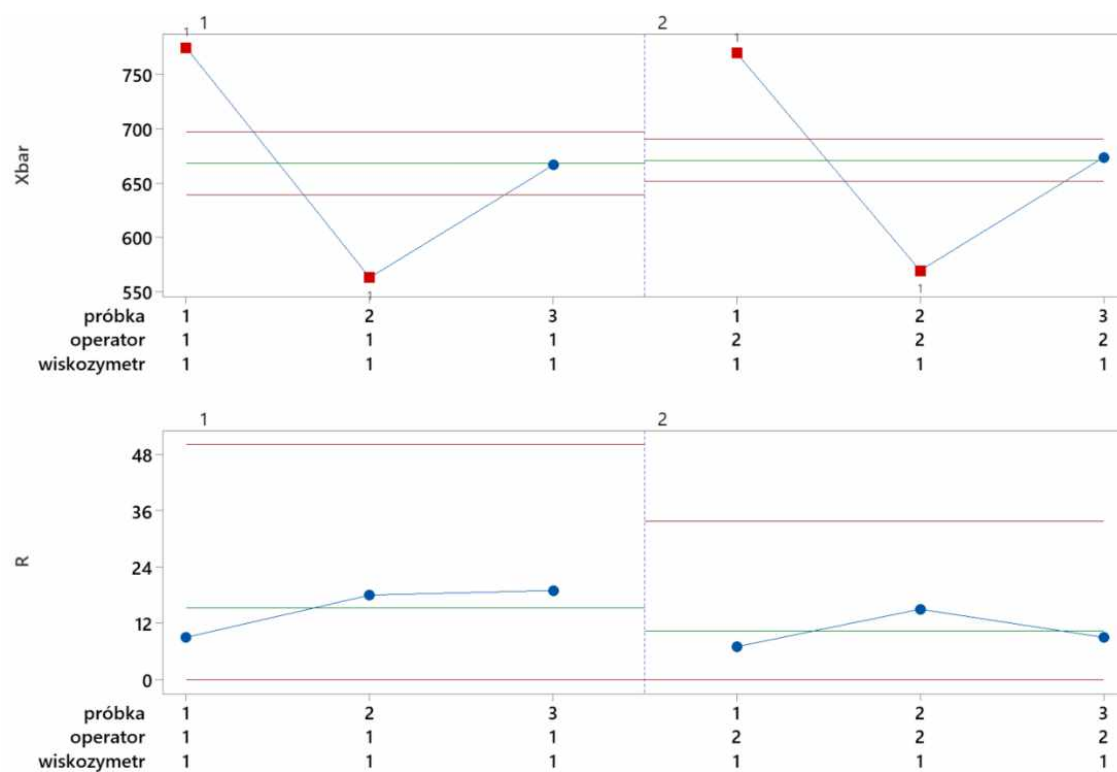
Rysunek 4.9 ilustruje kartę kontrolną $\bar{X}$ -R, uwzględniającą podział na poszczególnych laborantów biorących udział w badaniu, umożliwiającą identyfikację potencjalnego przesunięcia lub braku wzajemnej zastępowalności. W ocenianym przypadku wartość przesunięcia była marginalna, sprawiając, że laboranci okazali się w pełni zastępowalni.

Rysunek 4.8. Karta kontrolna Xbar-R – analiza systemu pomiarowego



Źródło: opracowanie własne przy użyciu programu Minitab Statistical Software 22

Rysunek 4.9. Karta kontrolna Xbar-R – analiza systemu pomiarowego z uwzględnieniem podziału na laborantów



Źródło: opracowanie własne przy użyciu programu Minitab Statistical Software 22

Analiza karty R ujawniła brak przyczyn specjalnych w obrębie testu, co potwierdziło, że zmienność pomiar do pomiaru była spójna, przewidywalna i stabilna, a tym samym nie występowały podstawy do kwestionowania uzyskanych wyników.

Z kolei interpretacja karty $\bar{X}$ dowiodła, że system pomiarowy funkcjonował prawidłowo. Wszystkie punkty przekroczyły wyznaczone granice kontrolne, wskazując, że zmienność pomiar do pomiaru nie była głównym źródłem zmienności w analizowanym teście.

Na podstawie karty kontrolnej R możliwe było także określenie, czy system pomiarowy charakteryzował się wystarczającym poziomem rozdzielczości. Analiza wykazała, że otrzymane wartości nie układały się na jednym poziomie, lecz przyjmowały charakter skokowy, co potwierdziło wystarczającą wartość jednostki pomiarowej w rozróżnianiu zmienności. W ujęciu wymagań jakości odpowiednia rozdzielczość systemu pomiarowego umożliwia wychwycenie nawet niewielkich zmian w procesie, co przekłada się na trafniejszą analizę odchyień. W rezultacie możliwe jest skuteczniejsze monitorowanie parametrów oraz wprowadzanie adekwatnych działań, co prowadzi do większej stabilności i przewidywalności wytwarzanych wyrobów⁴⁰⁸.

W celu dokładnego określenia rozdzielczości z wykorzystaniem karty R skorzystano ze wzoru (22). Po podstawieniu uzyskanych danych otrzymano:

$$\begin{aligned} \text{Minimalna liczba jednostek pomiarowych} &= \frac{UCL_R}{\text{jednostka pomiarowa}} + 1 = \\ &= \frac{41,93}{1} + 1 = 42,93 \end{aligned} \quad (45)$$

Wartość górnej granicy kontrolnej (UCL_R) została wyznaczona przez kartę R, natomiast jednostka pomiarowa oznaczała najmniejszą wartość, jaką przyrząd pomiarowy był w stanie zmierzyć. W analizowanym przypadku wynosiła ona 1.

Biorąc pod uwagę wielkość podgrupy ($n = 2$; rysunek 4.7), zgodnie ze stałymi przedstawionymi w tabeli 2.3 każda wartość wyniku na poziomie ≥ 4 wskazywała, że rozdzielczość systemu pomiarowego w obrębie analizowanego procesu była na odpowiednim poziomie.

Granice kontrolne na karcie wartości średnich obliczono, stosując wzory (1) oraz (2). Wcześniej należało obliczyć średnią arytmetyczną ze średnich wartości przypadających na każdą podgrupę, korzystając ze wzoru (3), a następnie określić średnią wartość rozstępu (4). Podstawiając otrzymane wyniki do równań, uzyskano:

⁴⁰⁸ X.Z. Wang, H. Zhou, Z.S. Zhai, *Research on Improving...*, s. 1021–1026.

$$\bar{\bar{x}} = \frac{\sum_{i=1}^n \bar{x}_i}{n} = \frac{774,5 + 563 + \dots + 673,5}{6} = 669,4 \quad (46)$$

$$\bar{R} = \frac{\sum_{i=1}^k R_i}{k} = \frac{9+18+\dots+9}{6} = 12,83 \quad (47)$$

$$GGK_{\bar{x}bar} = \bar{\bar{x}} + A_2 \cdot \bar{R} = 669,4 + 1,880 \cdot 12,83 = 693,5 \quad (48)$$

$$DGK_{\bar{x}bar} = \bar{\bar{x}} - A_2 \cdot \bar{R} = 669,4 - 1,880 \cdot 12,83 = 645,3 \quad (49)$$

Granice kontrolne na karcie rozstępu R obliczono na podstawie równań (5) i (6).

$$GGK_R = D_4 \cdot \bar{R} = 3,267 \cdot 12,83 = 41,92 \quad (50)$$

Ze względu na fakt, że liczność analizowanej podgrupy wynosiła 2, DGK_R przyjęła wartość 0.

$$n < 7, DGK_R = 0 \quad (51)$$

Wartości stałych – A_2 , D_3 oraz D_4 zależały od liczby obserwacji w podgrupie (tabela 2.1).

Różnice pomiędzy oszacowanymi wartościami kart kontrolnych a rezultatami pochodzącymi z programu Minitab wynikały z przyjętych zaokrągleń. Nie wpłynęło to jednak na interpretację danych procesowych w analizowanym studium przypadku.

Bazując na wartościach z karty Xbar, możliwe było oszacowanie precyzji systemu pomiarowego (rysunek 4.8). Łączna liczba punktów wynosiła 6, z czego 4 przekraczały wyznaczone granice, co stanowiło około 66,6%. Aby system pomiarowy został uznany za precyzyjny, przy $n = 2$, więcej niż 50% pomiarów powinno było znajdować się poza limitami. Tabela 2.4 ilustruje minimalną liczbę punktów przekraczających granice kontrolne w zależności od wielkości podgrupy. Wysoka powtarzalność systemu pomiarowego umożliwia spójne i wiarygodne monitorowanie istotnych parametrów w procesie, co znacząco wzmacnia trafność ocen jakościowych. W efekcie działania korygujące i doskonalące można oprzeć na pewnych danych, zapewniając kontrolę nad stabilnością oraz zgodnością wytwarzanych wyrobów z przyjętymi wymaganiami⁴⁰⁹.

Uzyskane wyniki w obrębie analizy nie dawały podstaw do uznania systemu pomiarowego za niewłaściwy, zatem możliwe było dalsze badanie procesu.

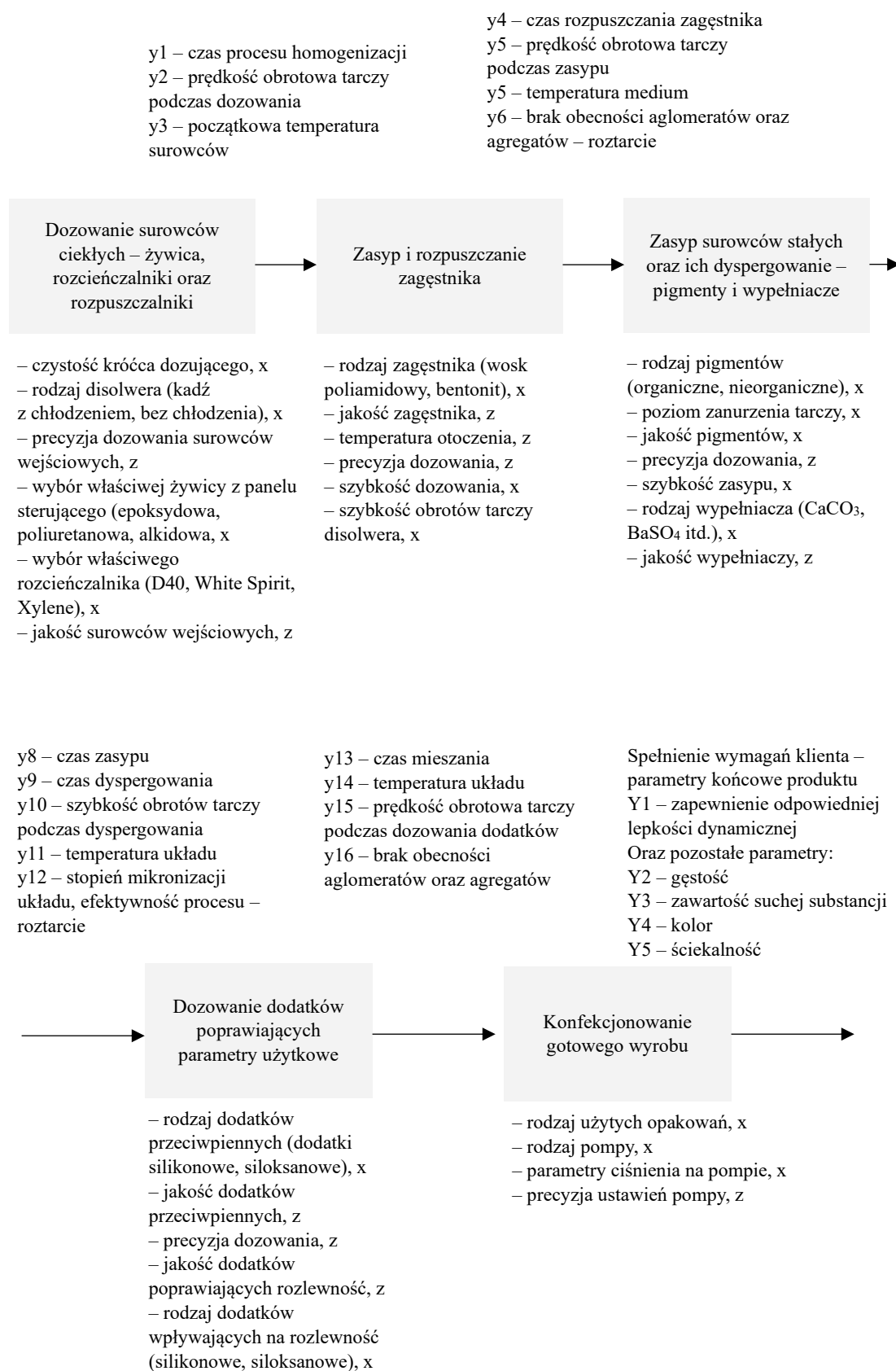
⁴⁰⁹ J. Jaworski, R. Kluz, T. Trzepieciński, *Research on Accuracy...*, s. 49–54.

4.4.3. Identyfikacja obszarów budujących zmienność procesu

Kolejnym znaczącym etapem w ujęciu modelu statystycznej kontroli procesu oraz projektowania eksperymentu, uwzględniając zasadę Pareto, jest identyfikacja dominujących obszarów wpływających na zmienność, pozwalająca na lepsze zrozumienie relacji przyczynowo-skutkowych w badanym procesie. Aby tego dokonać, należy wskazać potencjalne źródła zmienności, a następnie przeprowadzić analizę ilościową, która określi procentowy udział każdego z nich w ujęciu całościowym. Dodatkowo, w celu zwizualizowania przebiegu oraz identyfikacji możliwych przyczyn zmienności, opracowuje się mapę procesu, wyróżniając parametry, którymi można sterować (x), czynniki zakłócające (z) pozostające poza kontrolą, elementy (y) pełniące rolę stałych warunków procesowych (przykładowo utrzymywanie określonych parametrów technologicznych), a także wartości docelowe (Y), które są oczekiwane przez klienta (rysunek 4.10).

Rysunek 4.10 wskazuje, że w obrębie realizowanego procesu istniało wiele parametrów (x) mogących wpływać na jakość produktu. Pominięcie etapu identyfikacji obszaru generującego zmienność i przejście bezpośrednio do projektowania eksperymentu wymagałoby jednoczesnego testowania zbyt wielu czynników, co znacznie utrudniłoby skuteczną analizę. Dlatego kluczowe było ustalenie, który obszar procesu dominował w budowaniu zmienności naturalnej. W rezultacie możliwe stało się dalsze zawężenie listy możliwych czynników do najbardziej istotnych, co ułatwiło opracowanie spójnego planu DoE.

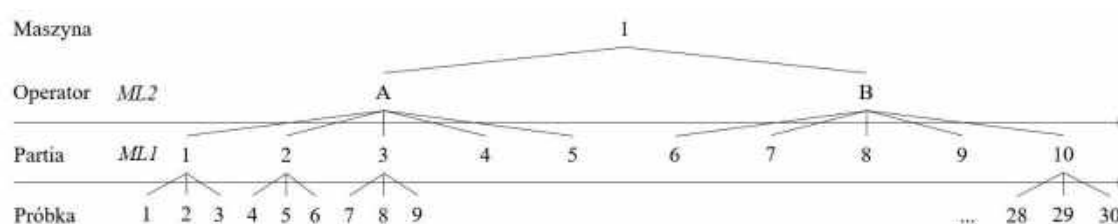
Rysunek 4.10. Szczegółowa mapa analizowanego procesu produkcji farby jednoskładnikowej



Źródło: opracowanie własne przy użyciu rzeczywistych danych procesowych

W obrębie analizowanego przypadku wyróżniono trzy obszary zmienności – próbka do próbki, partia do partii oraz operator do operatora. W celu dokładnego uchwycenia zmienności rozpoczęto pobieranie danych od poniedziałku (partie 1 oraz 6), przez środę (partie 2 oraz 7), piątek (partie 3 i 8), następny poniedziałek (partie 4 i 9), aż po kolejny piątek (partie 5 i 10). Na podstawie wiedzy procesowej wybrane dni uznano za istotne z uwagi na możliwe rozregulowanie po weekendzie lub bezpośrednio przed jego rozpoczęciem, a także ze względu na dostawy odmiennych partii surowców. Drzewo próbkowania przedstawiono na rysunku 4.11.

Rysunek 4.11. Drzewo próbkowania



Źródło: opracowanie własne przy użyciu rzeczywistych danych procesowych

Dla uproszczenia analizy drzewa próbkowania wprowadzono dwie linie podziału – ML1 i ML2, które oddzielały poszczególne obszary zmienności. Na podstawie rysunku 4.11 przygotowano tabelę źródeł zmienności (tabela 4.1), systematyzującą parametry procesu, na które można było oddziaływać (x), jak i czynniki zakłócające (z).

Tabela 4.1. Tabela źródeł zmienności

Obszar zmienności	Czynniki budujące zmienność
Operator do operatora	– zaangażowanie operatora – precyzyjność i staranność w wykonywaniu procedur; – doświadczenie operatora – znajomość procesów, receptur i zdolność szybkiego reagowania na odchylenia; – wykonanie procedury czyszczenia króćca dozującego; – rodzaj użytego disolwera (kadź z chłodzeniem lub bez chłodzenia); – precyzja dozowania surowców wejściowych; – szybkość dozowania; – poziom zanurzenia tarczy disolwera; – prędkość obrotowa tarczy disolwera; – precyzja ustawień pompy; – przygotowanie mieszalnika przed procesem (np. ustawienia parametrów wejściowych); – temperatura procesu – monitorowanie i utrzymanie prawidłowych warunków termicznych; – utrzymanie czasów technologicznych – przestrzeganie zadanych czasów

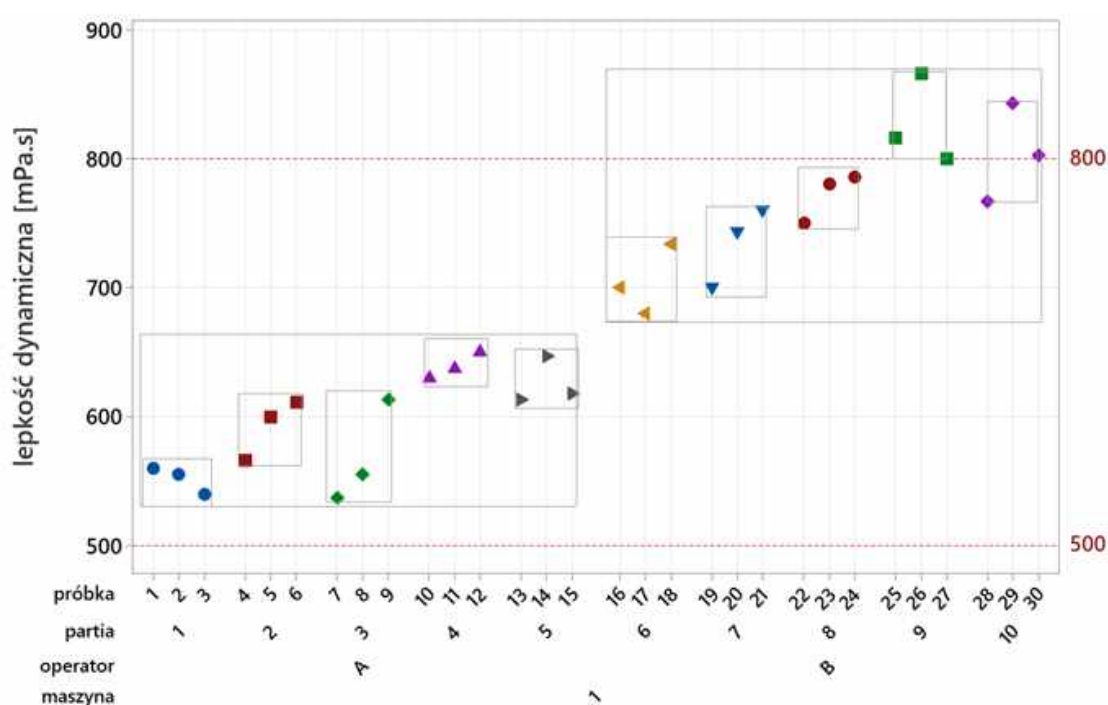
Obszar zmienności	Czynniki budujące zmienność
Partia do partii	– jakość surowców wejściowych; – dobór odpowiedniego rodzaju żywicy z panelu sterującego (epoksydowa, poliuretanowa, alkidowa); – wybór właściwego rozcieńczalnika (np. D40, White Spirit, Xylene); – rodzaj zagęstnika (np. воск poliamidowy, bentonit); – jakość zagęstnika; – temperatura otoczenia; – rodzaj pigmentów (organiczne, nieorganiczne); – jakość pigmentów; – rodzaj dodatków przeciwpiannych (np. silikonowe, siloksanowe); – jakość dodatków przeciwpiannych; – rodzaj dodatków wpływających na rozlewność (silikonowe, siloksanowe); – jakość dodatków poprawiających poziomowanie; – rodzaj wypełniacza (np. CaCO₃, BaSO₄); – jakość wypełniaczy
Próbka do próbki	– stopień homogeniczności próbki; – miejscowe przegrzanie próbki; – stopień aktywacji zagęstnika; – temperatura próbki; – poziom zanieczyszczenia narzędzia pobierającego

Źródło: opracowanie własne przy użyciu rzeczywistych danych procesowych

Przed przystąpieniem do ilościowego określenia rozkładu poszczególnych obszarów względem zmienności – w pierwszej kolejności należało ustalić dominujące źródło. Zebrane dane oparte na drzewie próbkowania (rysunek 4.11) analizowane były za pomocą metody praktycznej, wykorzystującej wykres *box plot* (rysunek 4.12). Metoda praktyczna stanowi podstawowe podejście w ramach interpretacji wyników, polegające na przedstawieniu mierzonych wartości w układzie zgodnym z przyjętym schematem zbierania danych, co pozwala na natychmiastową identyfikację dominującego obszaru.

Otrzymane wartości wskazały, że uchwycono realną zmienność procesu – pomiary mieściły się w zakresie 537–866 mPa·s, potwierdzając właściwe przygotowanie drzewa próbkowania. Ponadto nie zaobserwowano przyczyn specjalnych, gdyż brak odstających punktów pomiarowych w obrębie poszczególnych partii świadczył o występowaniu wyłącznie zmienności naturalnej. Nie pojawiły się również żadne wyraźne trendy, a poszczególne pomiary przedstawione w prostokątach reprezentujących partie układały się w sposób losowy. Uzyskane wyniki stanowiły podstawę do przeprowadzenia pogłębionych badań, ukierunkowanych na minimalizowanie zmienności w aspekcie przyjętych wymagań jakościowych.

Rysunek 4.12. Analiza praktyczna – *box plot*

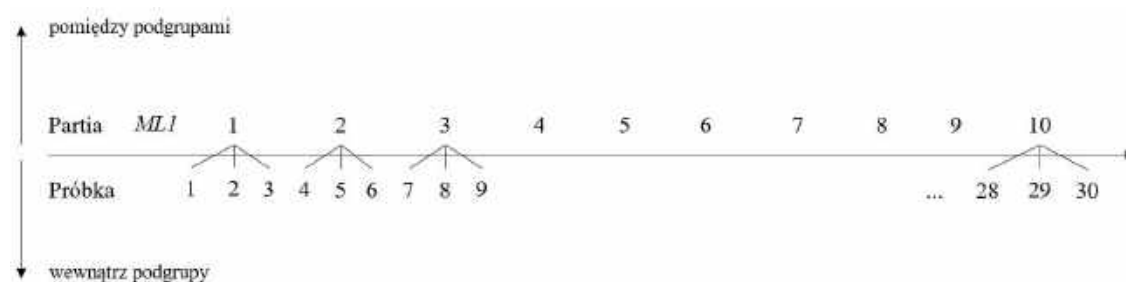


Źródło: opracowanie własne przy użyciu programu Minitab Statistical Software 22

Na podstawie wykresu można było wywnioskować, że największy wpływ na kształtowanie zmienności miał obszar związany z różnicą pomiędzy poszczególnymi operatorami – prostokąty reprezentujące dane pochodzące od operatora A oraz operatora B nie nachodziły na siebie. Natomiast wpływ zmienności pomiędzy partiami, jak i w obrębie pojedynczych próbek był wyraźnie mniejszy oraz mniej istotny w kontekście całościowej zmienności naturalnej procesu.

W celu potwierdzenia powyższych wskazań należało przeanalizować przypadek z wykorzystaniem analizy graficznej, która stanowi potwierdzenie, czy w procesie pojawia się wyłącznie zmienność naturalna oraz które źródło pełni istotną rolę. Triangulacja metod badawczych sprawia, że całościowa ocena staje się pełniejsza i bardziej odporna na błędy. Pierwszy krok analizy ukierunkowany był na poniższą strukturę drzewa próbkowania (rysunek 4.13).

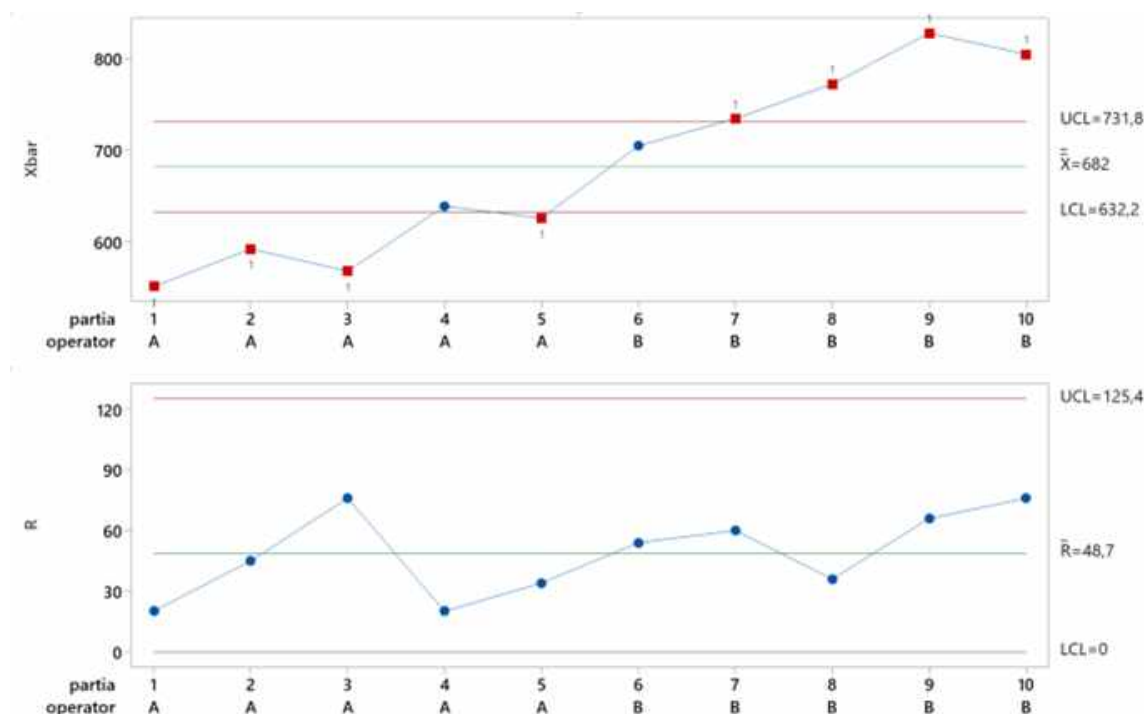
Rysunek 4.13. Struktura drzewa próbkowania – pierwszy etap analizy graficznej



Źródło: opracowanie własne przy użyciu rzeczywistych danych procesowych

Analiza graficzna opiera się na interpretacji kart kontrolnych typu Xbar-R. Przy użyciu programu Minitab wygenerowano odpowiednie wykresy (rysunek 4.14). Na karcie wartości średnich przedstawione zostały średnie z trzech próbek, natomiast na karcie R obliczono rozstęp pomiędzy obserwacjami pochodzącymi z jednej partii.

Rysunek 4.14. Karta kontrolna Xbar-R – krok pierwszy



Źródło: opracowanie własne przy użyciu programu Minitab Statistical Software 22

Wszystkie punkty na karcie rozstępu mieściły się w wyznaczonych granicach kontrolnych, potwierdzając brak przyczyn specjalnych oraz zgodność z wnioskami analizy praktycznej. Z kolei na wykresie Xbar widoczne były wartości poza ustalonymi limitami, co wskazywało na kluczową rolę zmienności pomiędzy podgrupami.

Granice kontrolne na karcie wartości średnich obliczone zostały w następujący sposób:

$$\bar{\bar{x}} = \frac{\sum_{i=1}^n \bar{x}_i}{n} = \frac{551,67 + 592,33 + \dots + 790}{10} = 682 \quad (52)$$

$$\bar{R} = \frac{\sum_{i=1}^k R_i}{k} = \frac{20+45+\dots+76}{10} = 48,7 \quad (53)$$

$$GGK_{\bar{x}} = \bar{\bar{x}} + A_2 \cdot \bar{R} = 682 + 1,023 \cdot 48,7 = 731,8 \quad (54)$$

$$DGK_{\bar{x}} = \bar{\bar{x}} - A_2 \cdot \bar{R} = 682 - 1,023 \cdot 48,7 = 632,2 \quad (55)$$

Dla $n = 3$ wartość stałej A_2 wynosiła 1,023.

GGK_R i DGK_R obliczono zgodnie z poniższymi równaniami:

$$GGK_R = D_4 \cdot \bar{R} = 2,574 \cdot 48,7 = 125,4 \quad (56)$$

Dla $n = 3$ wartość stałej D_4 wynosiła 2,574.

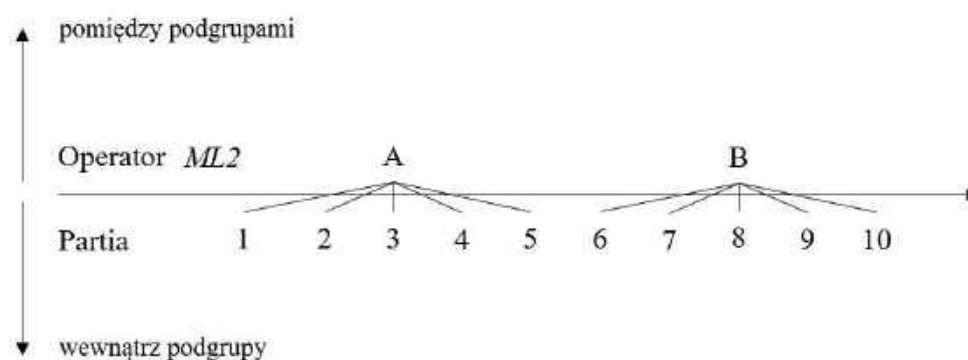
Ze względu na fakt, że licznosc analizowanej podgrupy wynosiła 3, DGK_R przyjęła wartość 0.

$$n < 7, DGK_R = 0 \quad (57)$$

Wartości stałych – A_2, D_3 oraz D_4 zależały od liczby obserwacji w podgrupie (tabela 2.1).

Odwołując się do ustaleń wynikających z pierwszego etapu analizy graficznej, wykazano, że dominującym obszarem zmienności nie była zmienność próbka do próbki. Dlatego ostateczna identyfikacja głównego źródła wymagała opracowania kolejnej karty kontrolnej, zgodnej ze strukturą przedstawioną na rysunku 4.15.

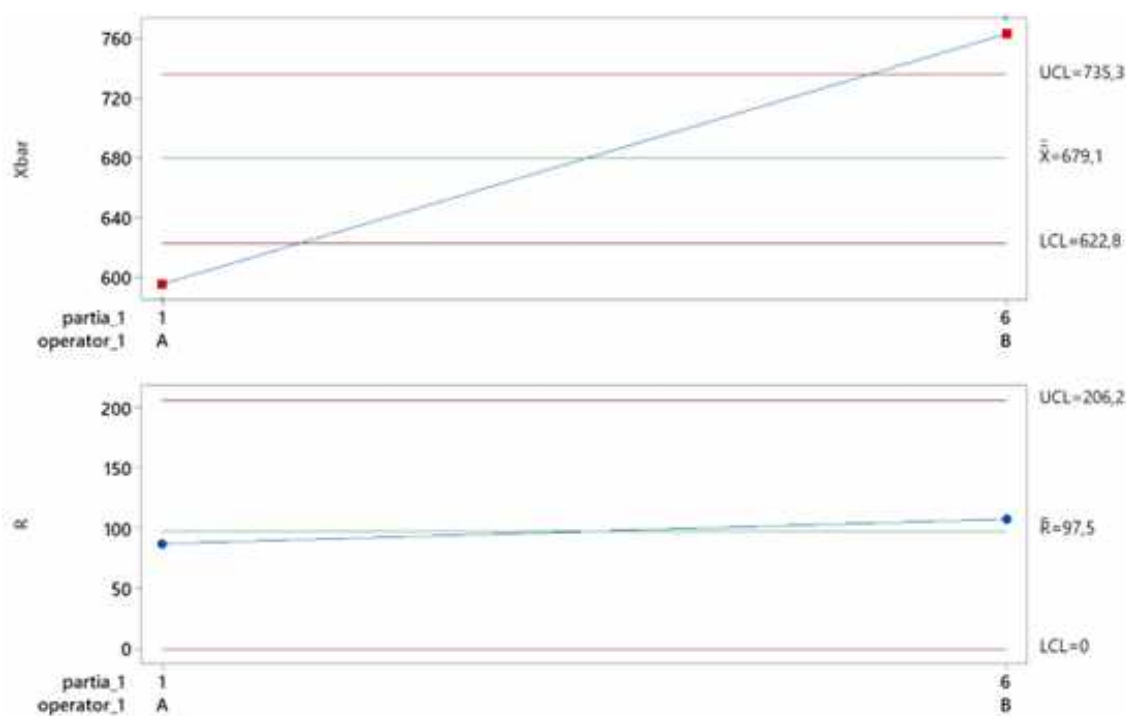
Rysunek 4.15. Struktura drzewa próbkowania – drugi etap analizy graficznej



Źródło: opracowanie własne przy użyciu rzeczywistych danych procesowych

W dalszej części badań należało sporządzić kartę wartości średnich i rozstępów dostosowaną do założeń drzewa próbkowania, zgodnie z kolejnym etapem analizy – rysunek 4.16.

Rysunek 4.16. Karta kontrolna Xbar-R – krok drugi



Źródło: opracowanie własne przy użyciu programu Minitab Statistical Software 22

Karta Xbar-R zawierała wyłącznie dwa punkty z uwagi na fakt, że wszystkie dane podzielono pomiędzy dwóch operatorów. Dla operatora A wyliczona została średnia z przypisanych wartości, analogicznie postąpiono w przypadku operatora B – zarówno w odniesieniu do średnich, jak i rozstępów.

Podobnie jak w pierwszym etapie analizy graficznej wszystkie punkty na karcie rozstępu mieściły się w wyznaczonych granicach kontrolnych, co potwierdziło brak przyczyn specjalnych. Jednocześnie na karcie Xbar pojawiły się punkty poza ustalonymi limitami, wskazując na dominujący obszar operator do operatora – zmienność pomiędzy podgrupami. Zdarzenie wskazywało, że zmienność między operatorami miała istotny wpływ na proces, co mogło skutkować nierównomiernością w jakości wyrobów końcowych. Otrzymany wynik podkreślał potrzebę standaryzacji pracy operatorów w celu zminimalizowania i poprawy spójności procesu produkcyjnego. Z uwagi na fakt, że w tym przypadku występowała wyłącznie jedna maszyna, rozszerzenie badania na

zmiennosc między różnymi urządzeniami nie było możliwe. W związku z tym analiza została zakończona.

GGK_{Xbar} i DGK_{Xbar} obliczono zgodnie ze wzorami:

$$\bar{\bar{x}} = \frac{\sum_{i=1}^n \bar{x}_i}{n} = \frac{595,5 + 762,7}{2} = 679,1 \quad (58)$$

$$\bar{R} = \frac{\sum_{i=1}^k R_i}{k} = \frac{87,3 + 107,7}{2} = 97,5 \quad (59)$$

$$GGK_{Xbar} = \bar{\bar{x}} + A_2 \cdot \bar{R} = 679,1 + 0,577 \cdot 97,5 = 735,3 \quad (60)$$

$$DGK_{Xbar} = \bar{\bar{x}} - A_2 \cdot \bar{R} = 679,1 - 0,577 \cdot 97,5 = 622,8 \quad (61)$$

Dla $n = 5$ wartość stałej A_2 wynosiła 0,577.

GGK_R i DGK_R obliczono, opierając się na poniższych równaniach:

$$GGK_R = D_4 \cdot \bar{R} = 2,114 \cdot 97,5 = 206,1 \quad (62)$$

Dla $n = 5$ wartość stałej D_4 wynosiła 2,114.

Liczność analizowanej podgrupy wynosiła 5, DGK_R przyjęła wartość 0.

$$n < 7, DGK_R = 0 \quad (63)$$

Wartości stałych – A_2 , D_3 oraz D_4 zależały od liczby obserwacji w podgrupie (tabela 2.1).

Różnice między oszacowanymi wartościami kart kontrolnych a wynikami programu Minitab wynikały z zaokrągleń. Nie wpływały one jednak na interpretację danych procesowych w analizowanym przypadku.

Analiza ilościowa określa procentowy rozkład poszczególnych obszarów zmienności, uwzględniając ich znaczenie w ujęciu holistycznym. W efekcie możliwe jest wskazanie grup odgrywających dominującą rolę w procesie. W tym kontekście szczególne znaczenie ma reguła Pareto, koncentrująca uwagę na niewielkiej liczbie istotnych elementów, ułatwiając wyznaczanie priorytetów w zakresie działań naprawczych oraz optymalizacyjnych. Poniższe równanie (64) prezentowało obszary zmienności, które składały się na zmienność naturalną analizowanego przypadku.

$$\begin{aligned} \hat{\sigma}_{\text{total}}^2 &= \hat{\sigma}_{\text{próbka do próbki}}^2 + \hat{\sigma}_{\text{partia do partii}}^2 + \hat{\sigma}_{\text{operator do operatora}}^2 \\ &= 100\% \end{aligned} \quad (64)$$

Procentowy udział zmienności próbka do próbki obliczono, wykorzystując poniższy wzór:

$$\hat{\sigma}_{\text{próbka do próbki}}^2 = \left(\frac{\bar{R}}{d_2}\right)^2 = \left(\frac{48,7}{1,693}\right)^2 = 827,45 \quad (65)$$

d_2 dla podgrupy o liczebności 3 wynosiło 1,693, natomiast wartość $\bar{R}$ została odczytana z karty kontrolnej przedstawionej na rysunku 4.14.

Kolejnym etapem było oszacowanie zmienności partia do partii, zgodnie z przedstawionym równaniem:

$$\begin{aligned} \hat{\sigma}_{\text{partia do partii}}^2 &= \left(\frac{\bar{R}}{d_2}\right)^2 - \frac{\hat{\sigma}_{\text{próbka do próbki}}^2}{3} = \left(\frac{97,5}{2,326}\right)^2 - \frac{827,45}{3} \\ &= 1481,26 \end{aligned} \quad (66)$$

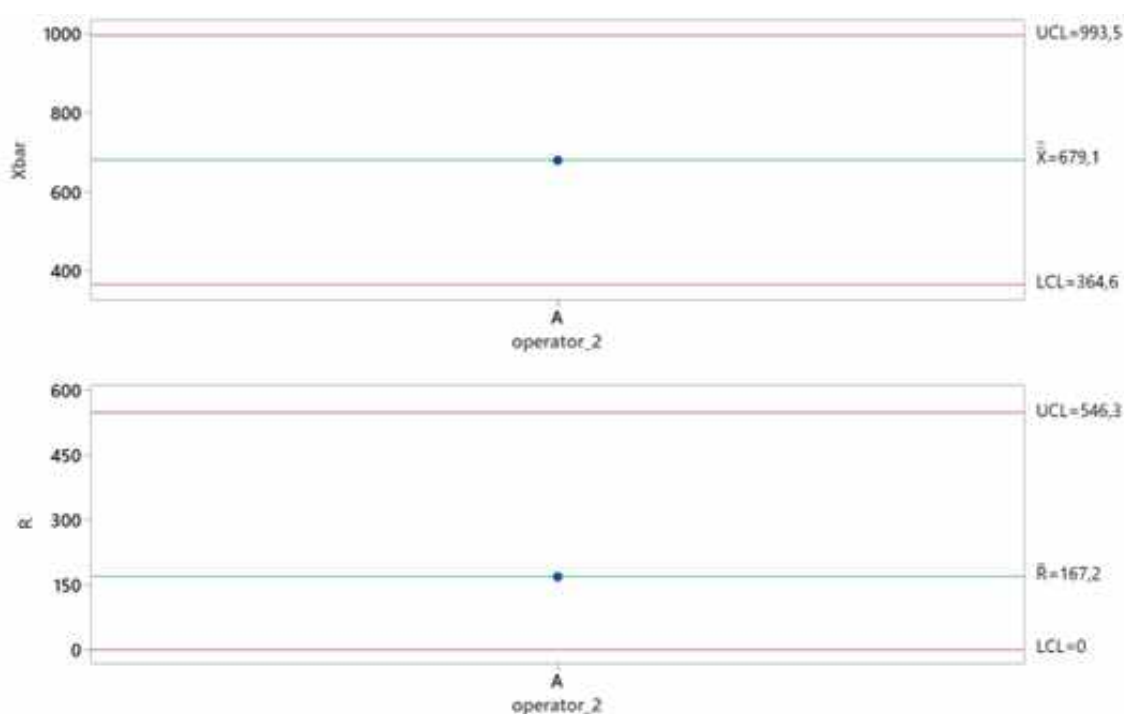
Wartość stałej d_2 dla $n = 5$ wynosiła 2,326, a wartość $\bar{R}$ odczytano z karty rozstępu (rysunek 4.16).

Zmienność operator do operatora obliczono w analogiczny sposób:

$$\begin{aligned} \hat{\sigma}_{\text{operator do operatora}}^2 &= \left(\frac{\bar{R}}{d_2}\right)^2 - \frac{\hat{\sigma}_{\text{partia do partii}}^2}{5} - \frac{\hat{\sigma}_{\text{próbka do próbki}}^2}{5 \cdot 3} \\ &= \left(\frac{167,2}{1,128}\right)^2 - \frac{1481,26}{5} - \frac{827,45}{15} = 21619,81 \end{aligned} \quad (67)$$

W tym przypadku wartość d_2 dla podgrupy o liczebności 2 wynosiła 1,128. Wartość $\bar{R}$ została odczytana z karty kontrolnej przedstawionej na rysunku 4.17.

Rysunek 4.17. Karta kontrolna Xbar-R – uzupełnienie analizy graficznej



Źródło: opracowanie własne przy użyciu programu Minitab Statistical Software 22

Obliczając zmienność totalną zgodnie z poniższym równaniem, otrzymano:

$$\hat{\sigma}_{\text{total}}^2 = 827,45 + 1481,26 + 21619,81 = 23928,52 = 100\% \quad (68)$$

Powyższe wartości wskazały, że istotnym źródłem zmienności była zmienność operator do operatora. Obliczając wartość procentową udziału, otrzymano:

– zmienność operator do operatora:

$$\frac{21619,81 \cdot 100\%}{23928,52} = 90,35\% \quad (69)$$

– zmienność partia do partii:

$$\frac{1481,26 \cdot 100\%}{23928,52} = 6,19\% \quad (70)$$

– zmienność próbka do próbki:

$$\frac{827,45 \cdot 100\%}{23928,52} = 3,46\% \quad (71)$$

Zmienność wyników pomiędzy operatorami stanowiła 90,35% całkowitej zmienności procesu, podczas gdy wpływ różnic między partiami wyniósł 6,19%, a dla obszaru próbka do próbki – 3,46%.

Kolejnym krokiem w badaniu było wskazanie czynników, które miały największy wpływ na budowanie zidentyfikowanego obszaru, poprzez projektowanie eksperymentu.

4.4.4. Projektowanie eksperymentu i ograniczenia wnioskowania

Na podstawie wcześniejszych analiz stwierdzono, że w kontekście parametru lepkości dynamicznej gotowego wyrobu najbardziej znaczący wpływ miała różnica w sposobie działania poszczególnych operatorów.

Odwołując się do tabeli 4.1, przedstawiającej zidentyfikowane obszary zmienności, wytypowano czynniki potencjalnie wpływające na obserwowane odchylenia. W tabeli 4.2 zaprezentowano elementy rozróżniające działania operatorów.

Tabela 4.2. Czynniki budujące zmienność – operator do operatora

Obszar zmienności	Czynniki budujące zmienność
Operator do operatora	– zaangażowanie operatora – precyzyjność i staranność w wykonywaniu procedur; – doświadczenie operatora – znajomość procesów, receptur i zdolność szybkiego reagowania na odchylenia; – wykonanie procedury czyszczenia króćca dozującego; – rodzaj użytego disolwera (kadź z chłodzeniem lub bez chłodzenia); – precyzja dozowania surowców wejściowych; – szybkość dozowania; – poziom zanurzenia tarczy disolwera; – prędkość obrotowa tarczy disolwera; – precyzja ustawień pompy; – przygotowanie mieszalnika przed procesem (np. ustawienia parametrów wejściowych); – temperatura procesu – monitorowanie i utrzymanie prawidłowych warunków termicznych; – utrzymanie czasów technologicznych – przestrzeganie zadanych czasów

Źródło: opracowanie własne przy użyciu rzeczywistych danych procesowych

Wiedza procesowa pozwoliła wyodrębnić kluczowe aspekty oraz potencjalne zakłócenia, które mogły bezpośrednio determinować różnice związane z pracą różnych operatorów. W pierwszej fazie skupiono się na zagęstniku, odpowiedzialnym za kształtowanie reologii produktu.

Do eksperymentu wybrano następujące czynniki:

A: zagęstnik – dwóch zaakceptowanych dostawców;

- B: sposób dozowania zagęstnika – szybkość;
- C: maksymalna temperatura podczas rozpuszczania zagęstnika;
- D: czas utrzymania, relaksacji zagęstnika w określonej temperaturze po jego rozpuszczeniu w celu poprawy aktywacji;
- E: szybkość obrotów tarczy dyspergującej.

Ze względu na specyfikę chemiczną badanego składnika rekomendowana temperatura aktywacji, przy której surowiec osiąga maksimum działania, mieściła się w zakresie 55–65°C, natomiast optymalny czas relaksacji wynosił 30 minut.

W ramach planowanych działań zastosowany został eksperyment frakcjonowany 2^{5-1410} . Czynniki testowano na dwóch poziomach (+ i –), zgodnie z tabelą 4.3. Rezolucja V umożliwia oddzielną analizę efektów głównych i interakcji dwuczynnikowych, co przekłada się na dokładniejsze wyniki. Należy przy tym pamiętać, że efekt główny jest uwikłany z interakcją czwartego rzędu ($A = BCDE$), a interakcje drugiego rzędu są powiązane z interakcjami trzeciego rzędu ($AB = CDE$) – tabela 2.9.

Struktura aliasów w analizowanym eksperymencie frakcjonowanym:

$$\begin{aligned}
 [A] &= A + BCDE \\
 [B] &= B + ACDE \\
 [C] &= C + ABDE \\
 [D] &= D + ABCE \\
 [E] &= E + ABCD \\
 [AB] &= AB + CDE \\
 [AC] &= AC + BDE \\
 [AD] &= AD + BCE \\
 [AE] &= AE + BCD \\
 [BC] &= BC + ADE \\
 [BD] &= BD + ACE \\
 [BE] &= BE + ACD \\
 [CD] &= CD + ABE \\
 [CE] &= CE + ABD \\
 [DE] &= DE + ABC
 \end{aligned}$$

⁴¹⁰ W. Luo, M. Pla-Roca, D. Juncker, *Taguchi Design-Based Optimization...*, s. 5767–5774.

Tabela 4.3. Tabela czynników i poziomów – DoE

Czynnik	Poziom	
	–	+
A: producent	x	y
B: sposób wprowadzenia zagęstnika do układu	porcjami	w całości
C: temperatura [°C]	50	60
D: czas utrzymania [min]	0	30
E: szybkość obrotowa tarczy dyspergującej [obr/min]	1000	2000

Źródło: opracowanie własne przy użyciu rzeczywistych danych procesowych

Oprócz czynników uwzględnionych w eksperymencie należało rozważyć zakłócenia, które mogły wpływać na uzyskane wyniki. Aby zagwarantować wartość poznawczą doświadczenia, konieczne było wdrożenie właściwej strategii zarządzania. Za potencjalne źródła zakłóceń uznano:

- Setup A – precyzję dozowania zagęstnika;
- Setup B – precyzję związaną z dodaniem zagęstnika w odpowiednich porcjach;
- Setup C – precyzję pomiaru temperatury;
- Setup D – precyzję pomiaru czasu;
- Setup E – precyzję nastawy odpowiedniej szybkości wału dla tarczy dyspergującej.

Pozostałe fazy produkcji, poza rozpuszczaniem zagęstnika, realizowano w identyczny sposób dla każdej kombinacji. Mimo to nie można było wykluczyć pewnych odchyłeń w dalszych krokach podczas wytwarzania produktu finalnego.

Pierwszy etap testów DoE zrealizowano na próbkach o objętości 2,5 litra, przygotowanych w laboratorium. W ramach doświadczenia zastosowano następujące ograniczenia:

- Próbkę przygotowano, wykorzystując jeden typ disolwera.
- W eksperymencie uczestniczył jeden operator i jeden laborant wykonujący pomiary.
- Stosowano stałe partie zagęstników: surowiec x pochodził wyłącznie z partii 1, natomiast surowiec y z partii 2.
- Czas utrzymania zagęstnika w określonej temperaturze liczono od momentu uzyskania wymaganej wartości temperatury, po czym natychmiast wyłączano tarczę dyspergującą.
- Podczas dozowania zagęstnika disolwer pracował z prędkością ustaloną w macierzy eksperymentu.

- Proces prowadzono w metalowym wiaderku o pojemności 2,5 litra, przy czym recepturę przeliczono na 2 litry.
- Średnica tarczy dyspergującej wynosiła 10 cm.

W tabeli 4.4 przedstawiono matrycę eksperymentu wygenerowaną w programie Minitab, według której analizowano omawiany przypadek. Podane wartości lepkości dynamicznej odpowiadały wynikom uzyskanym podczas poszczególnych przebiegów.

Tabela 4.4. Matryca eksperymentu frakcjonowanego – studium przypadku

Przebieg	Kombinacja	A	B	C	D	E	Lepkość dynamiczna [mPa·s]
1	1	–	–	–	–	+	430
2	1	–	–	–	–	+	444
3	2	–	–	–	+	–	630
4	2	–	–	–	+	–	645
5	3	–	–	+	–	–	410
6	3	–	–	+	–	–	400
7	4	–	–	+	+	+	720
8	4	–	–	+	+	+	738
9	5	–	+	–	–	–	370
10	5	–	+	–	–	–	377
11	6	–	+	–	+	+	626
12	6	–	+	–	+	+	644
13	7	–	+	+	–	+	433
14	7	–	+	+	–	+	440
15	8	–	+	+	+	–	700
16	8	–	+	+	+	–	711
17	9	+	–	–	–	–	427
18	9	+	–	–	–	–	450
19	10	+	–	–	+	+	600
20	10	+	–	–	+	+	628
21	11	+	–	+	–	+	400
22	11	+	–	+	–	+	405
23	12	+	–	+	+	–	711
24	12	+	–	+	+	–	720
25	13	+	+	–	–	+	389
26	13	+	+	–	–	+	390
27	14	+	+	–	+	–	650
28	14	+	+	–	+	–	636
29	15	+	+	+	–	–	427
30	15	+	+	+	–	–	438
31	16	+	+	+	+	+	690
32	16	+	+	+	+	+	711

Źródło: opracowanie własne przy użyciu rzeczywistych danych procesowych

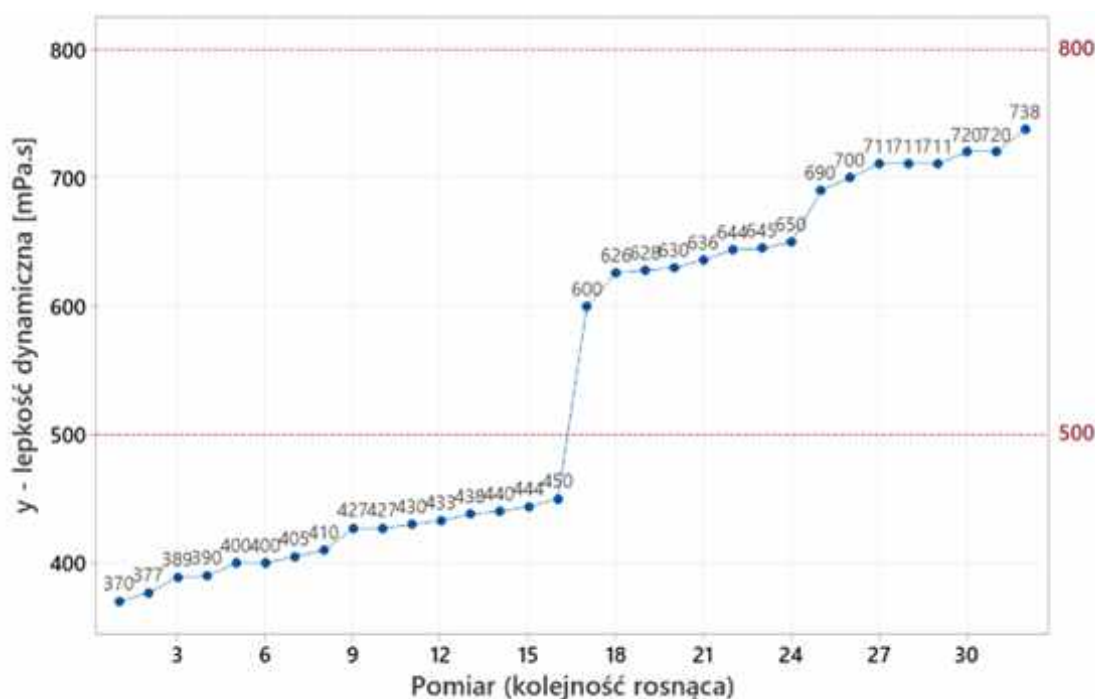
Eksperyment frakcjonowany 2_V^{5-1} zakłada 16 przebiegów. Aby zminimalizować wpływ potencjalnych zakłóceń, zastosowano strategię powtórzeń (*replicates*), przewidującą dwukrotne wykonanie każdego z nich. Pozwoliło to potwierdzić poprawność uzyskanych wyników. Badania prowadzono w laboratorium, co umożliwiło realizację przyjętej strategii bez nadmiernego obciążenia zasobów. Gdyby jednak analogiczne testy odbywały się w środowisku produkcyjnym, 32 przebiegi oznaczałyby znaczące ograniczenia czasowe i finansowe. Należy pamiętać, że celem eksperymentu jest wywołanie interesujących zjawisk w procesie, co oznacza, że otrzymane partie mogą obejmować zarówno wyroby zgodne z założeniami, jak i takie, które nie nadają się do wprowadzenia na rynek, co ma decydujące znaczenie w kontekście budowania jakości produktu.

Nie stwierdzono znaczących różnic w wartościach dla poszczególnych kombinacji, potwierdzając powtarzalność wyników lepkości dynamicznej. Wszystkie testy realizowano zgodnie z numeracją kolejnych przebiegów.

Pierwszym etapem analizy było przygotowanie wykresu szeregów czasowych (*time series plot*), aby zbadać, czy pojawiła się wyraźna zmienność otrzymanych rezultatów. Innymi słowy, wykres taki pozwala sprawdzić, czy eksperyment został zaprojektowany na tyle dobrze, aby pokazać ciekawe zdarzenia, a także ocenić, czy w obrębie eksperymentu nie wystąpiła zmienność specjalna. Wykres szeregów czasowych daje możliwość oceny reprezentatywności uzyskanych wyników w kontekście badanego zjawiska, co stanowi podstawę do wyciągania wniosków. Dane na wykresie uporządkowano w sposób rosnący, od wartości najniższych po najwyższe, co przedstawiono na rysunku 4.18.

Znaczny wzrost lepkości dynamicznej z 450 mPa·s do 600 mPa·s między pomiarem 16 a 17 wskazał na silny efekt główny w badanym układzie. Nagła zmiana wartości była wynikiem reakcji jednego z czynników lub interakcji na układ, co zostało określone w kolejnych badaniach w ramach prowadzonej analizy. Eksperyment pozwolił uzyskać wyniki poniżej wyznaczonej granicy, dobrze dopasowane pomiary oraz wartości z górnego przedziału specyfikacji, co potwierdza właściwy dobór czynników i ich poziomów.

Rysunek 4.18. Wykres szeregów czasowych



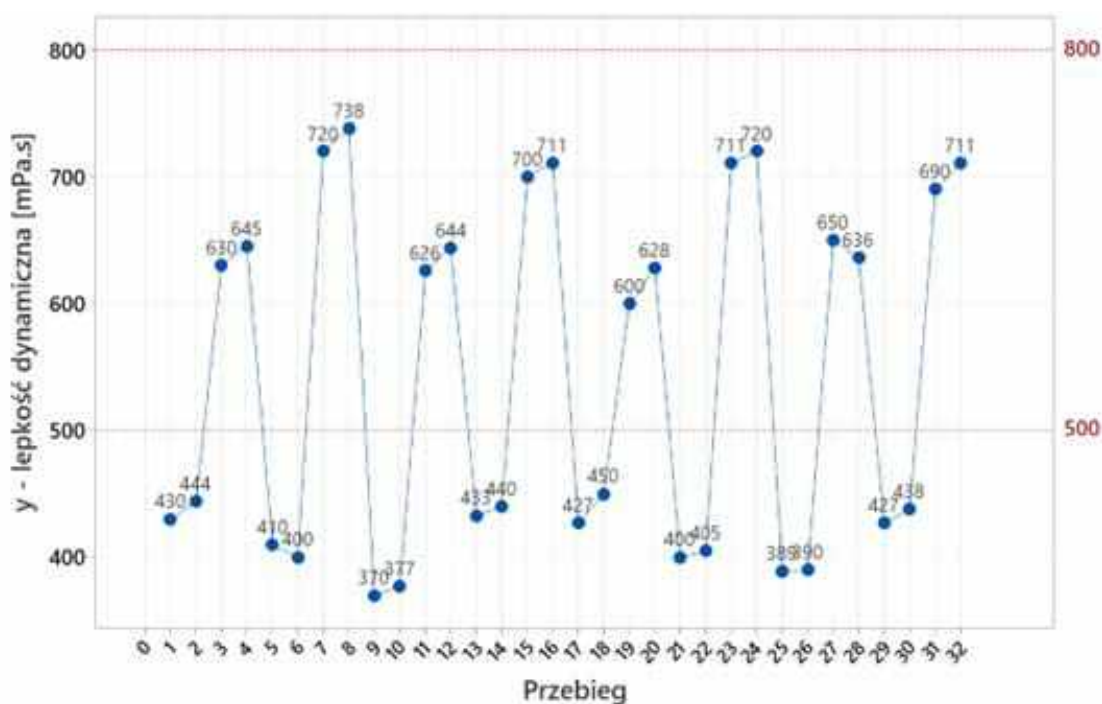
Źródło: opracowanie własne przy użyciu programu Minitab Statistical Software 22

Kolejny krok w ramach postępowania badawczego stanowiło przygotowanie wykresu rozrzutu punktów. Narzędzie potwierdza losowość przebiegu eksperymentu oraz wyklucza zależność DoE od czasu⁴¹¹.

Rysunek 4.19 przedstawia rzeczywistą kolejność poszczególnych etapów eksperymentu. Wykres rozrzutu charakteryzował się pełną losowością, co dowiodło braku zależności otrzymanych wartości od czasu. Nie zaobserwowano też trendów w postaci systematycznego wzrostu lub spadku wyników, natomiast same wartości przyjęły nieregularną formę. Układ rosnący lub malejący wskazywałby na istnienie zewnętrznego czynnika wpływającego na eksperyment i zaburzającego wiarygodność analizy, co skutkowałoby koniecznością powtórzenia prowadzonych eksperymentów w celu uzyskania jakościowych danych.

⁴¹¹ H.D. Smith [i in.], *Using Visual Data Mining...*, s. 905–917.

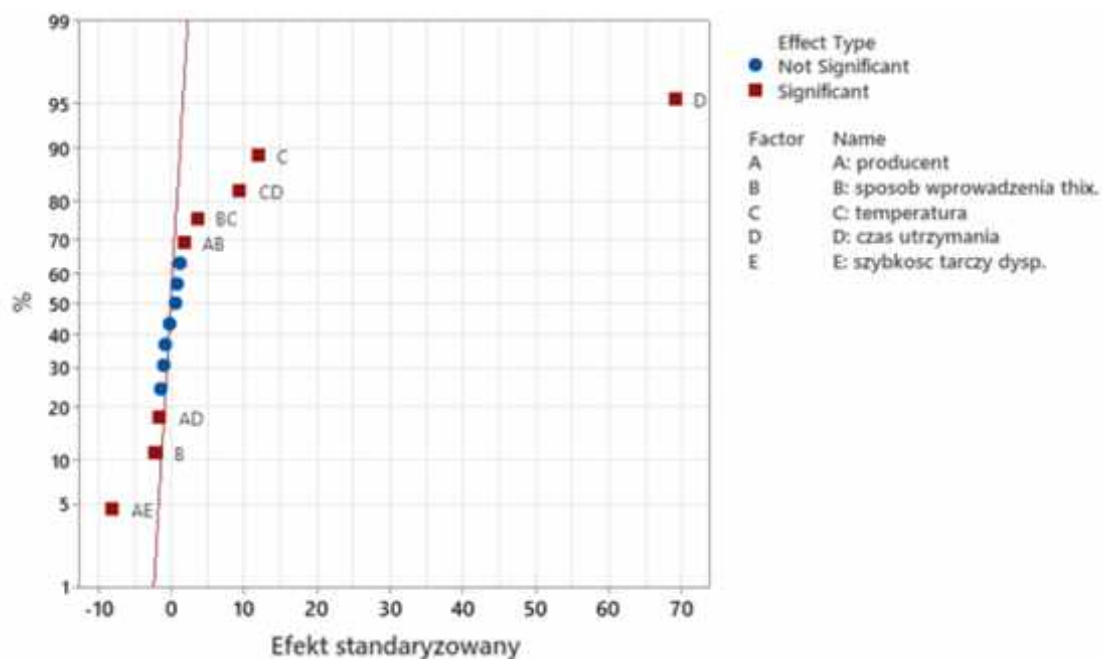
Rysunek 4.19. Wykres rozrzutu punktów



Źródło: opracowanie własne przy użyciu programu Minitab Statistical Software 22

Dalsza analiza danych skoncentrowana była na opracowaniu wykresu efektów standaryzowanych, który umożliwia wyznaczenie dominujących czynników i istotnych interakcji. Otrzymane rezultaty wskazały, że dominującą rolę odgrywał czynnik D (rysunek 4.20).

Rysunek 4.20. Wykres efektów standaryzowanych



Źródło: opracowanie własne przy użyciu programu Minitab Statistical Software 22

Oprócz znaczącego wpływu czasu utrzymania wskazano także istotność czynników B i C oraz interakcji CD, BC, AB, AD i AE. Charakteryzowały się one natomiast mniejszą istotnością, a zakres ich kontroli był uzależniony od wartości efektów. Wyższe wartości efektów wskazywały na większe znaczenie danego czynnika lub interakcji, co pozwalało na skuteczne ukierunkowanie działań w zarządzaniu jakością procesu. Wykres opracowano, przyjmując poziom istotności statystycznej $\alpha = 20\%$, co było zgodne z zasadą Pareto i pozwoliło wyróżnić efekty o największym wpływie na przebieg analizowanego procesu. Wyniki eksperymentu przedstawiono na rysunku 4.21.

Rysunek 4.21. Wartości efektów głównych – studium przypadku

Coded Coefficients				
Term	Effect	Coef	SE Coef	T-Value
Constant		543.44	1.87	291.21
A: producent	-2.87	-1.44	1.87	-0.77
B: sposob wprowadzenia thix.	-7.87	-3.94	1.87	-2.11
C: temperatura	44.87	22.44	1.87	12.02
D: czas utrzymania	258.13	129.06	1.87	69.16
E: szybkość tarczy dysp.	-0.88	-0.44	1.87	-0.23
A: producent*B: sposob wprowadzenia thix.	6.62	3.31	1.87	1.78
A: producent*C: temperatura	-3.38	-1.69	1.87	-0.90
A: producent*D: czas utrzymania	-5.63	-2.81	1.87	-1.51
A: producent*E: szybkość tarczy dysp.	-29.87	-14.94	1.87	-8.00
B: sposob wprowadzenia thix.*C: temperatura	13.63	6.81	1.87	3.65
B: sposob wprowadzenia thix.*D: czas utrzymania	4.88	2.44	1.87	1.31
B: sposob wprowadzenia thix.*E: szybkość tarczy dysp.	2.63	1.31	1.87	0.70
C: temperatura*D: czas utrzymania	35.37	17.69	1.87	9.48
C: temperatura*E: szybkość tarczy dysp.	3.37	1.69	1.87	0.90
D: czas utrzymania*E: szybkość tarczy dysp.	-4.88	-2.44	1.87	-1.31

Źródło: opracowanie własne przy użyciu programu Minitab Statistical Software 22

Analiza liczbową potwierdziła wnioski wynikające z interpretacji wykresu efektów standaryzowanych (rysunek 4.20). Wartości efektów głównych obliczono, stosując wzór (28), natomiast wartości efektów interakcji – zgodnie ze wzorem (30).

Obliczenia dla efektu głównego D przedstawiają się następująco:

$$E_D = \bar{Y}_{D+} - \bar{Y}_{D-} = \frac{630 + 645 + \dots + 711}{16} - \frac{430 + 444 + \dots + 438}{16} \quad (72)$$

$$= 672,5 - 414,375 = 258,1$$

Obliczona wartość efektu głównego D wyniosła 258,1.

Średnie odpowiedzi dla kombinacji poziomów czynników A i B (interakcja AB) wyliczono na podstawie danych z tabeli 4.5.

Tabela 4.5. Matryca odpowiedzi – interakcja AB

Przebieg	Kombinacja	A	B	AB	Lepkość dynamiczna [mPa·s]
1	1	–	–	+	430
2	1	–	–	+	444
3	2	–	–	+	630
4	2	–	–	+	645
5	3	–	–	+	410
6	3	–	–	+	400
7	4	–	–	+	720
8	4	–	–	+	738
9	5	–	+	–	370
10	5	–	+	–	377
11	6	–	+	–	626
12	6	–	+	–	644
13	7	–	+	–	433
14	7	–	+	–	440
15	8	–	+	–	700
16	8	–	+	–	711
17	9	+	–	–	427
18	9	+	–	–	450
19	10	+	–	–	600
20	10	+	–	–	628
21	11	+	–	–	400
22	11	+	–	–	405
23	12	+	–	–	711
24	12	+	–	–	720
25	13	+	+	+	389
26	13	+	+	+	390
27	14	+	+	+	650
28	14	+	+	+	636
29	15	+	+	+	427
30	15	+	+	+	438
31	16	+	+	+	690
32	16	+	+	+	711

Źródło: opracowanie własne przy użyciu rzeczywistych danych procesowych

Podstawiając uzyskane wartości do wzorów otrzymano:

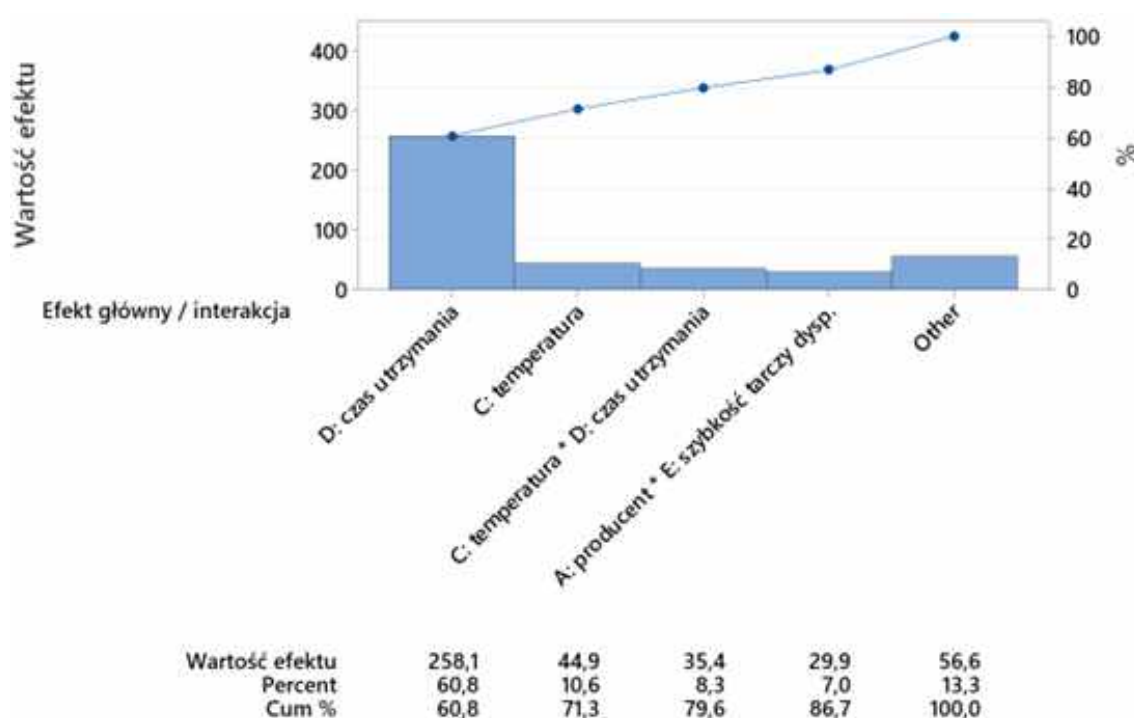
$$\begin{aligned}
 E_{AB} &= \overline{AB}^+ - \overline{AB}^- = \frac{430 + 444 + \dots + 711}{16} - \frac{370 + 377 + \dots + 720}{16} \\
 &= 546,75 - 540,125 = 6,62
 \end{aligned}
 \tag{73}$$

Obliczona wartość efektu interakcji wyniosła 6,62.

Wartości pozostałych efektów oraz interakcji kalkulowane były w analogiczny sposób.

Wyniki przedstawione na wykresie Pareto ukazały wyraźną dominację wartości efektu D. Uwzględniając skalę i specyfikę efektów uznano go za dominujący w analizowanym układzie⁴¹². W konsekwencji dalszy etap badania skoncentrowano wyłącznie na czasie utrzymania.

Rysunek 4.22. Wykres Pareto – efektów głównych i interakcji

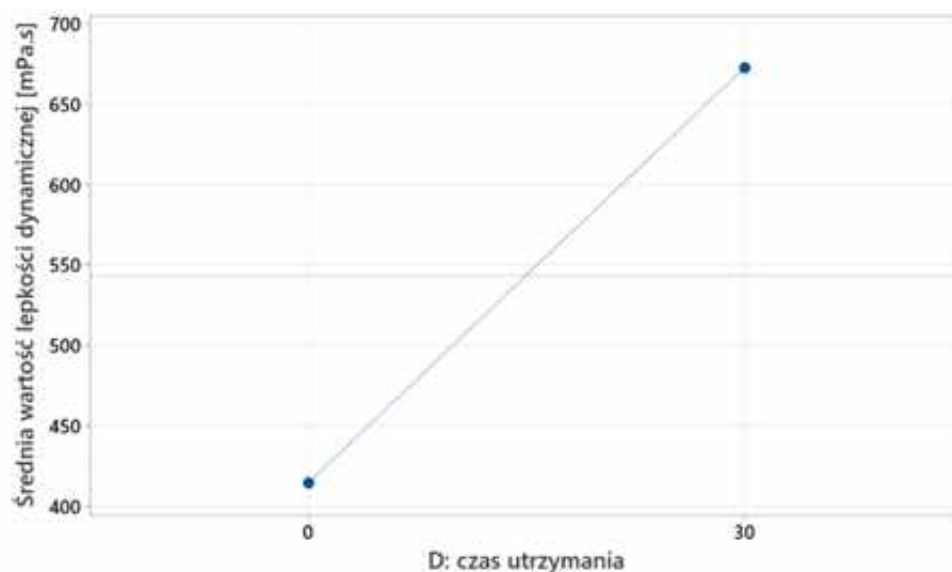


Źródło: opracowanie własne przy użyciu programu Minitab Statistical Software 22

Ze względu na istotny wpływ czasu utrzymania (czynnik D) na jakość produktu opracowano wykres efektu głównego, który ukazuje, jak zmiana poziomu tego czynnika z „-” (0 minut) na „+” (30 minut) wpływała na wartości lepkości dynamicznej (rysunek 4.23).

⁴¹² M. Korkmaz [i in.], *Boron removal...*, s. 687–697.

Rysunek 4.23. Wykres efektu głównego D: czas utrzymania

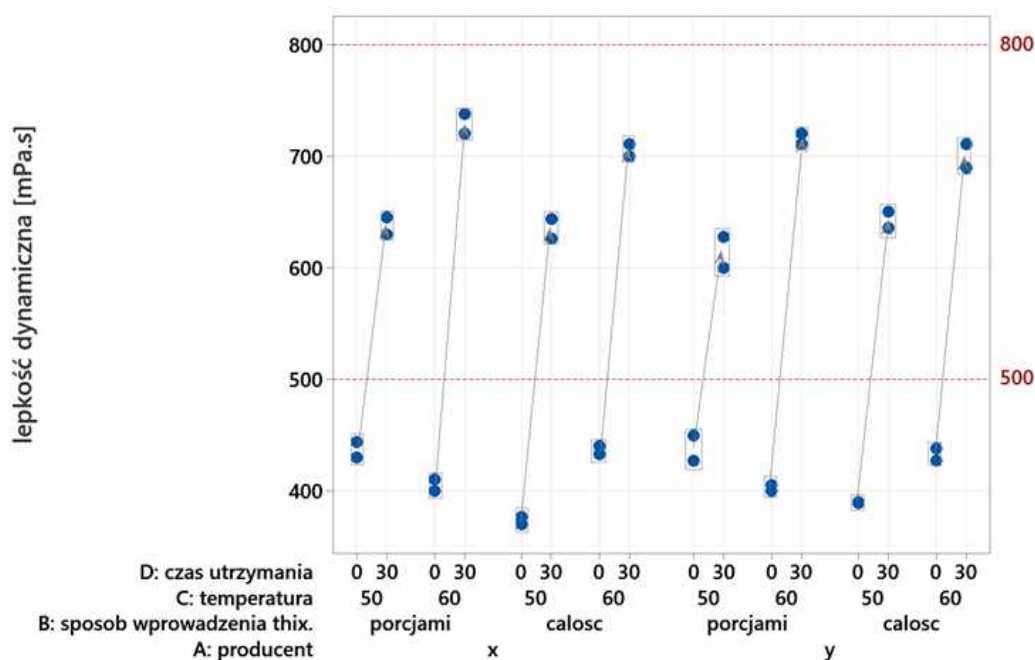


Źródło: opracowanie własne przy użyciu programu Minitab Statistical Software 22

Interpretacja wykresu wykazała, że wydłużenie czasu utrzymania z 0 do 30 minut powodowało wzrost średniej lepkości dynamicznej z 414,4 mPa·s do 672,5 mPa·s.

Aby w pełni zrozumieć zależności w analizowanym przypadku, zastosowano wykres *box plot*, który przedstawia czynniki kształtujące zmienność naturalną procesu (rysunek 4.24). Z uwagi na znikomą wartość efektu czynnika E (bliską 0) jego wpływ na lepkość uznano za pomijalny.

Rysunek 4.24. Box plot – wpływ czynników na wartość parametru lepkości dynamicznej



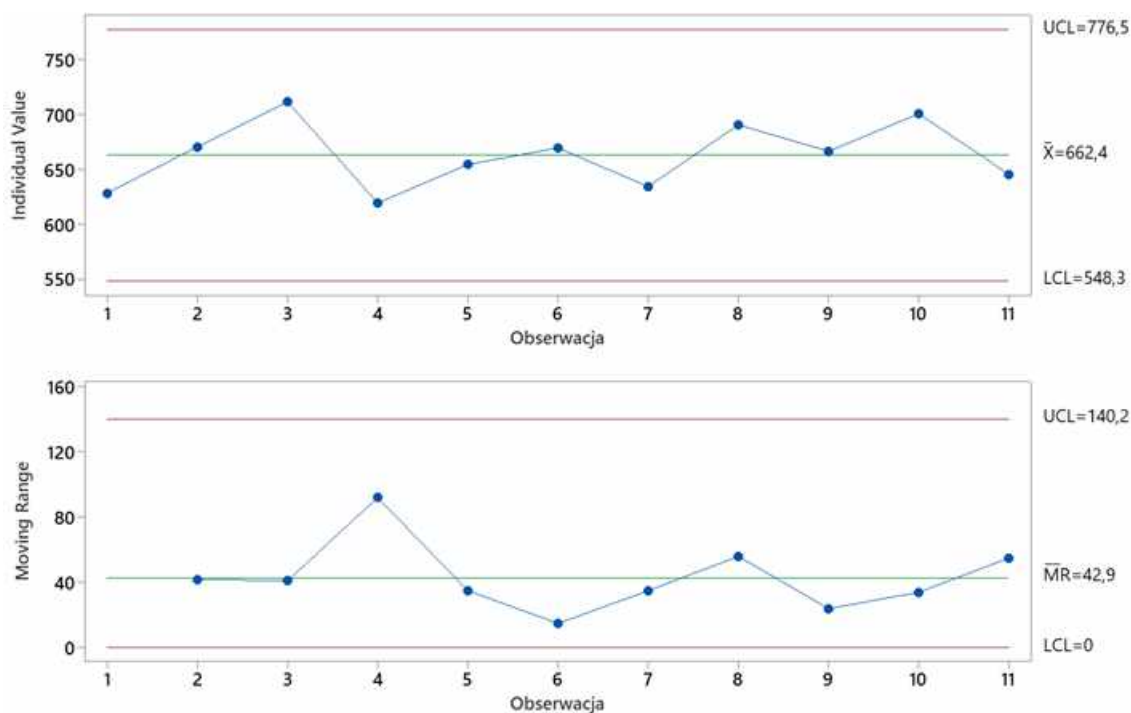
Źródło: opracowanie własne przy użyciu programu Minitab Statistical Software 22

Analizując dane przedstawione na rysunku 4.24, zauważono, że znacząca część pomiarów wykraczała poza zdefiniowaną granicę specyfikacji. Szczególnie wyraźny trend obserwowany był w przypadkach, w których czas utrzymania wynosił 0. Jednocześnie w odniesieniu do próbek mieszczących się w przyjętych limitach zauważono zależność wskazującą, że wyższe wartości parametru uzyskiwane były przy dłuższym czasie utrzymania (czynnik D) oraz podwyższonej temperaturze (czynnik C).

Stwierdzono, że uzyskanie lepkości dynamicznej w centralnym obszarze granic specyfikacji nie było zależne od producentów surowca ani od sposobu implementacji zagęstnika. Natomiast kluczowe okazały się temperatura na poziomie 50°C oraz przestrzeganie czasu utrzymania wynoszącego 30 minut.

Powyższe wskazania wprowadzono w środowisku produkcyjnym, aby potwierdzić ich skuteczność w warunkach rzeczywistej produkcji, a nie tylko w skali laboratoryjnej. Na rysunku 4.25 zaprezentowano kartę kontrolną IMR ukazującą wpływ wytycznych procesowych – czasu utrzymania (30 minut) oraz temperatury (50°C) – na uzyskiwane wartości. W pozostałych obszarach procesu nie wprowadzono zmian, gdyż nie były one przedmiotem przeprowadzonego eksperymentu. Dane odnosiły się do jedenastu partii wyprodukowanych pilotażowo.

Rysunek 4.25. Karta kontrolna IMR – zmienność partii pilotażowych



Źródło: opracowanie własne przy użyciu programu Minitab Statistical Software 22

Analiza karty kontrolnej wartości indywidualnych wskazała, że uzyskane pomiary lepkości dynamicznej mieściły się w przedziale 619–711 mPa·s, co było zgodne z przyjętymi granicami specyfikacji. Zmienność po wdrożeniu rekomendowanych warunków była mniejsza niż dla danych z rysunku 4.5. Należy jednak podkreślić istotę dalszego monitorowania procesu.

Wnioskiem płynącym z przeprowadzonego badania była konieczność ścisłego przestrzegania ustalonego reżimu technologicznego. Brak zrozumienia źródeł zmienności procesu mógłby prowadzić do dalszego rozregulowania, potęgując utratę jakości. Opracowanie wskazań technologicznych opartych na modelu SPC, DoE i zasadzie Pareto umożliwiało etapowe rozpoznanie natury problemu oraz wskazanie kluczowych czynników wpływających na zmienność. Zintegrowane podejście przełożyło się na bardziej świadomą i skuteczną kontrolę procesu, pokazując, że identyfikacja dominujących czynników pozwala skutecznie zarządzać produktem, zwiększając jego zgodność z wymaganiami jakościowymi.

4.5. Ograniczenia modelu SPC i DoE w połączeniu z zasadą Pareto

Implementacja zintegrowanego modelu SPC oraz DoE, uzupełnionego równoległym wykorzystaniem zasady Pareto, stanowi wielowymiarowe podejście pozwalające na kompleksową analizę oraz skuteczne zarządzanie zmiennością w procesach. Mimo licznych korzyści płynących z wdrożenia należy uwzględnić szereg ograniczeń, których ignorowanie może prowadzić do błędnych wniosków, a w dalszej perspektywie do niewłaściwej alokacji zasobów.

Zaprezentowany model obejmuje trzy zasadnicze elementy: statystyczną kontrolę procesu, w której wykorzystuje się karty kontrolne $\bar{X}$ -R dla podgrup oraz IMR dla wartości indywidualnych; DoE, umożliwiające systematyczne eksperymentowanie w celu identyfikacji kluczowych czynników kształtujących zmienność; a także zasadę Pareto, wspomagającą właściwe wykorzystanie zasobów w obszarach o największym wpływie na poprawę jakości.

W aspekcie statystycznej kontroli procesu istotną barierą pozostaje konieczność założenia normalnego rozkładu danych. Karty kontrolne Shewharta – $\bar{X}$ -R czy IMR – opierają się na opisywanym założeniu⁴¹³. Gdy dane odbiegają od rozkładu normalnego,

⁴¹³ A.B. Bogó, E. Henning, A. Kalbusch, *Statistical parametric and non-parametric control charts for monitoring residential water consumption*, „Scientific Reports” 2023, vol. 13, no. 1, 13543.

określenie wiarygodnych limitów kontrolnych staje się utrudnione, co może skutkować nieprawidłową oceną stabilności procesu⁴¹⁴. W takiej sytuacji należy sięgnąć po karty dostosowane do nietypowych rozkładów – karty sumy skumulowanej (CUSUM) czy wykładniczo ważonej średniej ruchomej (EWMA).

Dodatkowym utrudnieniem jest ograniczona zdolność kart Shewharta do wychwycenia niewielkich bądź stopniowych zmian w średniej lub wariancji. Podczas gdy standardowe karty kontrolne reagują dobrze na duże odchylenia, karty CUSUM i EWMA pozwalają lepiej uchwycić mniej widoczne trendy⁴¹⁵. Wybór właściwej karty kontrolnej zależy zatem od charakterystyki danego procesu oraz rodzaju zmian wymagających monitorowania⁴¹⁶. Skuteczne wykorzystanie SPC oznacza konieczność głębokiego zrozumienia założeń, mocnych i słabych stron poszczególnych rozwiązań oraz umiejętnego łączenia ich z innymi strategiami poprawy jakości.

Projektowanie eksperymentów stanowi kolejny istotny element omawianego modelu. Umożliwia systematyczną analizę zależności między czynnikami a odpowiedzią układu. Jednym z podstawowych ryzyk w aspekcie stosowania DoE może być jego złożoność. Wraz ze wzrostem liczby badanych czynników trudność w opracowaniu, przeprowadzeniu oraz interpretacji eksperymentów znacznie rośnie, co stanowi wyzwanie dla osób dysponujących ograniczoną wiedzą statystyczną. Ponadto złożone systemy oraz wielowymiarowe interakcje mogą doprowadzić do niewłaściwych wniosków, jeśli planowanie lub realizacja eksperymentu nie zostaną przeprowadzone z należytą starannością⁴¹⁷.

Dodatkowo nadmierne poleganie na technikach planowania eksperymentów, bez uwzględnienia faktycznej wiedzy o procesie, może prowadzić do osłabienia kompetencji eksperckich. Mechaniczne stosowanie podejścia eksperymentalnego nieoparte krytyczną refleksją nad uzyskanymi wynikami zwiększa ryzyko błędnych decyzji. Świadomość ograniczeń DoE, w tym znajomość zalet i wad poszczególnych podejść, umożliwia pełniejsze wykorzystanie potencjału narzędzi przy jednoczesnym unikaniu pomyłek wynikających ze zbyt dużego uproszczenia.

⁴¹⁴ S.A. Abbasi, A. Miller, *On proper choice of variability control chart for normal and non-normal processes*, „Quality and Reliability Engineering International” 2012, vol. 28, no. 3, s. 279–296.

⁴¹⁵ A.M. Chaudhary [i in.], *Efficient Monitoring of a Parameter of Non-Normal Process Using a Robust Efficient Control Chart: A Comparative Study*, „Mathematics” 2023, vol. 11, no. 19, 4157.

⁴¹⁶ N. Abbas, M. Riaz, R.J. Does, *Mixed exponentially weighted moving average – cumulative sum charts for process monitoring*, „Quality and Reliability Engineering International” 2013, s. 345–356.

⁴¹⁷ N. Costa, *Design of experiments—overcome hindrances and bad practices*, „The TQM Journal” 2019, vol. 31, no. 5, s. 772–789.

Istotne jest także uwzględnienie barier praktycznych związanych z DoE. Fizyczne ograniczenia sprzętu, wymagania bezpieczeństwa, koszty oraz dostępność zasobów mogą sprawić, że niektóre projekty eksperymentalne pozostaną niewykonalne lub trudno będzie je zrealizować w konkretnych warunkach procesowych.

Zasada Pareto stosowana równolegle z SPC i DoE ma pomóc w ukierunkowaniu wysiłków na obszary o największym potencjale do poprawy. Jednak nadmierne upraszczanie zjawisk powodowane jej wykorzystaniem może zniekształcać obraz rzeczywistości. Zasada Pareto sugeruje, że 80% skutków wynika z 20% przyczyn, lecz w praktyce powiązania są często znacznie bardziej złożone⁴¹⁸. Brak uwzględnienia interakcji oraz zależności między czynnikami może ograniczyć skuteczność modelu, dlatego tak ważne jest wzajemne uzupełnianie się SPC, DoE i zasady Pareto.

Kolejne utrudnienie wiąże się z jakością i dostępnością danych. Pełne i reprezentatywne informacje są niezbędne do właściwej oceny procesów za pomocą SPC, DoE i zasady Pareto. Jeśli dane są niekompletne lub nieadekwatne do charakteru procesu, poprawność wniosków staje się dyskusyjna. W wielu przypadkach trudności w pozyskaniu wysokiej jakości informacji stanowią poważną barierę dla wdrożenia modelu.

Nie należy też pomijać roli kultury organizacyjnej. Brak nastawienia na ciągłe doskonalenie lub niewystarczające zaangażowanie najwyższej kadry zarządzającej może utrudnić bądź nawet uniemożliwić skuteczne wdrożenie. Odpowiednie warunki w organizacji, wsparcie ze strony decydentów oraz motywowanie pracowników do realizowania inicjatyw doskonalących to istotne czynniki sprzyjające wykorzystaniu potencjału zintegrowanego modelu SPC, DoE i zasady Pareto.

Podsumowując, zintegrowanie i skuteczne zastosowanie omawianych rozwiązań w obszarze zarządzania jakością może napotkać na znaczne trudności. Elastyczne dopasowanie modelu do specyfiki procesu, dostosowanie narzędzi do rozkładów danych innych niż normalne, świadome wykorzystanie projektowania eksperymentów oraz rozważne posługiwanie się zasadą Pareto przyczyniają się do podniesienia skuteczności działań i sprzyjają szerszemu rozpowszechnieniu koncepcji w praktyce.

⁴¹⁸ G. Singh, D. Singh, *CSFs for Six Sigma implementation...*, s. 795–818.

4.6. Podsumowanie

1. W przeprowadzonym badaniu połączono zasadę Pareto ze statystyczną kontrolą procesu i projektowaniem eksperymentu, tworząc spójny model wspierający skuteczne zarządzanie jakością.
2. SPC i DoE z równoległym zastosowaniem zasady Pareto obejmują wieloetapową analizę: od oceny rozkładu danych i ich zgodności ze specyfikacją, poprzez ocenę systemu pomiarowego, aż po identyfikację dominujących w budowaniu zmienności czynników procesowych.
3. Składowe modelu wzajemnie się uzupełniają: SPC monitoruje stabilność i wskazuje konieczność podjęcia działań, DoE pozwala na racjonalne eksperymentowanie, a także skuteczne szukanie czynników budujących zmienność procesu, podczas gdy zasada Pareto ukierunkowuje wysiłki na obszary, które przyniosą największą poprawę.
4. Działanie modelu przedstawiono na przykładzie procesu wytwarzania farby jednoskładnikowej, w którym lepkość dynamiczna stanowiła kluczowe kryterium jakości, decydujące o właściwościach reologicznych i walorach użytkowych gotowego produktu.
5. Za pomocą metod praktycznych, graficznych oraz ilościowych wykazano, że kluczowy wpływ na finalną wartość parametru lepkość farby miała zmienność obszaru pomiędzy operatorami.
6. Zastosowanie projektowania eksperymentów z wykorzystaniem frakcjonowanego układu 2^{5-1}_V pozwoliło na zidentyfikowanie i wyodrębnienie spośród czynników kształtujących zmienność operator do operatora tych, które miały istotny wpływ na uzyskanie właściwych wartości parametru, eliminując konieczność czasochłonnego testowania wszystkich zmiennych pojedynczo. Eksperyment przeprowadzono w skali laboratoryjnej.
7. Poprzez analizę wyników przeprowadzonego eksperymentu potwierdzono, że dominującą rolę w procesie odgrywa czas utrzymania zagęstnika w określonej temperaturze (czynnik D), ponadto możliwe było także wskazanie optymalnych parametrów procesowych (30 minut utrzymania, w temp. 50°C), zapewniających, że lepkość produktu będzie się mieścić w centralnym obszarze specyfikacji.
8. Wdrażając rekomendowane parametry w środowisku produkcyjnym, osiągnięto wyraźną poprawę stabilności procesu, utrzymując wartości lepkości dynamicznej

w pożądanym zakresie, ograniczając nadmierną zmienność i poprawiając powtarzalność wyników.

9. Zaproponowany model łączący SPC, DoE z zasadą Pareto pozwala na stopniowe, metodyczne identyfikowanie źródeł zmienności, pełne zrozumienie ciągu przyczynowo-skutkowego i ukierunkowanie działań na najważniejsze obszary wpływające na jakość.
10. Zasada Pareto w połączeniu z metodami SPC i DoE skutecznie wspiera identyfikację kluczowych czynników wpływających na zmienność procesu, umożliwiając priorytetyzację działań i optymalizację parametrów.
11. Proponowany zintegrowany model, łączący statystyczną kontrolę procesu, projektowanie eksperymentu oraz zasadę Pareto, może przynieść znaczące korzyści, jednak nie jest pozbawiony ograniczeń, które należy uwzględnić w praktyce.
12. Ograniczenia obejmują: konieczność dostępu do rzetelnych danych, złożoność interakcji pomiędzy czynnikami, potrzebę dopasowania do lokalnej specyfiki procesu oraz wysokie wymagania kompetencyjne i zasobowe.
13. Przedstawione podejście, mimo związanych z nim wyzwań, stanowi istotny wkład w doskonalenie obszaru zarządzania jakością, ułatwiając racjonalne podejmowanie decyzji, obniżanie kosztów i trwale podnoszenie standardów produkcyjnych.

ZAKOŃCZENIE

Jakość w procesach produkcyjnych stanowi istotny czynnik zarówno w dążeniu do doskonałości operacyjnej, jak i w spełnianiu oczekiwań klientów, obejmując różne obszary – od jakości surowców, poprzez przebieg procesów wytwarzania, aż po finalne produkty. Podniesienie poziomu jakości bezpośrednio wpływa na standardy gotowych wyrobów, co wskazuje na znaczenie zintegrowanego zarządzania⁴¹⁹. Zależność ta uwypukla potrzebę systematycznego podejścia do zapewniania jakości, sprzyjającego jednocześnie wzmocnieniu pozycji konkurencyjnej przedsiębiorstwa na rynku⁴²⁰.

Z perspektywy filozoficznej jakość postrzegana jest jako proces ciągłego doskonalenia, zorientowany na klienta i generujący wartość dodaną. Badania potwierdzają, że wdrożenie systemów zarządzania jakością korzystnie wpływa na efektywność produkcji, redukując odpady i zwiększając produktywność⁴²¹. Istotne jest także podkreślenie, że jakość nie powinna być charakteryzowana jako pojęcie statyczne, lecz jako dynamiczny proces wymagający stałej oceny i doskonalenia. Wdrażanie nowych technologii dodatkowo wspiera cały proces, umożliwiając monitorowanie i kontrolę parametrów w czasie rzeczywistym, a także przyczyniając się do umacniania kultury jakości w organizacji. Zastosowanie rozwiązań Przemysłu 4.0 pozwala na skuteczne gromadzenie i analizowanie dużych zbiorów danych, zwiększając dokładność w identyfikacji istotnych wskaźników⁴²². Opisywane podejście nie tylko poprawia cechy produktów, lecz także sprzyja ogólnej skuteczności podejmowanych działań. Hästbacka i in. podkreślają, że integracja zaawansowanych rozwiązań w zakresie monitorowania i kontroli jest niezbędna do osiągnięcia wysokiej jakości wyników w procesach przemysłowych⁴²³. Ponadto związek między zrównoważonym rozwojem a jakością zyskuje na znaczeniu w nowoczesnej produkcji, ponieważ przedsiębiorstwa dążą do

⁴¹⁹ A. Supriadi, *The Influence of Quality of Raw Materials and Quality of Production Processes on Product Quality of MSMEs: A Moderation Analysis of Supplier Partnerships*, „International Journal of Islamic Business and Management Review” 2022, vol. 2, no. 2, s. 237–248.

⁴²⁰ D.P. Kafetzopoulos, E.L. Psomas, K.D. Gotzamani, *The impact of quality management systems on the performance of manufacturing firms*, „International Journal of Quality & Reliability Management” 2015, vol. 32, no. 4, s. 381–399.

⁴²¹ Tamże.

⁴²² B. Huang [i in.], *Research on Process Quality Prediction and Control of Spindle Housings in Flexible Production Lines*, „Applied Sciences” 2023, vol. 13, no. 14, 8371.

⁴²³ D. Hästbacka, P. Kannisto, M. Vilkkö, *Data-driven and Event-driven Integration Architecture for Plant-wide Industrial Process Monitoring and Control*, w: *IECON 2018–44th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society*, 2018, s. 2979–2985.

minimalizacji śladu węglowego przy jednoczesnym utrzymaniu maksymalnej jakości oraz skuteczności działań.

Integralnym elementem zarządzania jakością w procesie produkcyjnym jest monitorowanie, analiza i kontrola procesów, które zapewniają stabilność i zgodność z wymaganiami. W tym kontekście istotną rolę odgrywa zastosowanie zasady Pareto, statystycznej kontroli procesu oraz projektowania eksperymentu. Wykorzystane równolegle, tworzą one fundament skutecznego zarządzania jakością.

Opisywane rozwiązanie pozwala na zdefiniowanie relacji przyczynowo-skutkowych zachodzących w procesie, ułatwiając wskazanie najistotniejszych czynników kształtujących finalną jakość produktu. Etapowość i systematyczne podejście sprawiają, że model znajduje praktyczne zastosowanie w analizie procesów, skutecznie wspierając ich doskonalenie i optymalizację.

Zastosowanie zasady Pareto umożliwia ukierunkowanie działań i szybsze określenie najważniejszych czynników wpływających na jakość. SPC w opisywanym modelu opiera się na zastosowaniu kart kontrolnych, które pełnią funkcję narzędzi monitorujących, analizujących dane procesowe oraz wspierających inicjatywy ciągłego doskonalenia. Ich kluczową rolą jest szybka identyfikacja niezgodności w procesie oraz określenie rodzaju zmienności – naturalnej lub specjalnej. Ponadto dają możliwość utrzymania stabilności procesów poprzez wyznaczanie odpowiednich limitów kontrolnych. Karty Shewharta ustalają granice na poziomie trzech odchyłeń standardowych od średniej wartości procesu.

Projektowanie eksperymentu polega na manipulowaniu zmiennymi wejściowymi w celu zbadania ich wpływu na zmierzoną zmienną odpowiedzi. DoE umożliwia zarówno planowanie, jak i przeprowadzenie analizy, co ułatwia interpretację danych uzyskanych w poszczególnych przebiegach prowadzonych eksperymentów.

Równoległe zastosowanie opisanych podejść wpływa także na rozwój obszaru zgodnie z założeniem normy ISO 9001 – międzynarodowym standardem określającym wymagania dotyczące systemów zarządzania jakością. Integralnym elementem ISO 9001 jest ciągłe doskonalenie poprzez monitorowanie oraz optymalizację procesów na podstawie danych oraz identyfikacja przyczyn występujących problemów⁴²⁴.

⁴²⁴ K. Naveen, R. Senanayake, C.P. Selvan, *Continual improvement through ISO 9001 – An evidence based audit conducted in 200 organizations*, „IOP Conference Series: Materials Science and Engineering” 2021, vol. 1104, 012038.

W analizowanym przypadku kompleksowość modelu oraz zasady Pareto daje możliwość elastycznego dostosowania działań do specyfiki badanego procesu. Model opiera się na sekwencyjnym podejściu, które obejmuje ocenę zgodności danych, identyfikację problemów związanych z położeniem lub zmiennością oraz rozróżnienie między zmiennością naturalną a specjalną. Na podstawie uzyskanych wyników możliwe jest podjęcie działań ukierunkowanych na dominujące obszary, z wykorzystaniem zasady Pareto, koncentrując się na najistotniejszych czynnikach wpływających na jakość procesu.

Dostępna literatura naukowa nie dostarcza pogłębionych analiz, które łączyłyby wskazane podejścia w ujęciu jednego modelu. Badania skupiają się na ich odrębnej implementacji, ograniczając możliwość pełnego zrozumienia zależności przyczynowo-skutkowych, a także ich skutecznego wdrażania w praktyce. Nieliczne prace poświęcone równoległemu wykorzystaniu podejść mają dość ogólny charakter, co sprawia, że nie dostarczają dokładnych wytycznych w kontekście analizy ani sposobu formułowania konkretnych wniosków⁴²⁵. Należy także podkreślić, że wiele dotychczasowych opracowań koncentruje się na aspekcie teoretycznym, pomijając rzeczywiste studia przypadku oraz analizę danych empirycznych.

W związku ze zidentyfikowaną luką badawczą osadzoną w obszarze metodologicznym wartością dodaną rozprawy doktorskiej jest kompleksowa integracja podejść w zarządzaniu jakością procesów produkcyjnych. Założeniem wdrożonego rozwiązania była dokładna identyfikacja i redukcja źródeł zmienności.

Głównym celem analizy prowadzonej w ramach rozprawy doktorskiej była ocena skuteczności zastosowania zasady Pareto w połączeniu z integralnym modelem statystycznej kontroli procesu oraz projektowania eksperymentu w zarządzaniu jakością procesów produkcyjnych.

Otrzymane wyniki potwierdzają osiągnięcie założonego celu analizy, dowodząc skuteczności zaproponowanego modelu wspieranego zasadą Pareto w ramach studium przypadku dotyczącego produkcji farby jednoskładnikowej. Wykazano, że równoległa implementacja podejść pozwoliła na identyfikację istotnych czynników wpływających na jakość produktu, umożliwiając optymalizację parametrów w kierunku redukcji zmienności oraz poprawy stabilności procesu.

⁴²⁵ M. Tanco, E. Viles, L. Pozueta, *Are All Designs...*; J. Kechagias, K. Kitsakis, N. Vaxevanidis, *Comparison...*, s. 1–4.

Uzyskane rezultaty stanowią jednocześnie potwierdzenie hipotezy 1: *Implementacja zasady Pareto, opisującej uniwersalną prawidłowość wskazującą na koncentrację kluczowych czynników mających największy wpływ na wynik, w połączeniu z integralnym modelem statystycznej kontroli procesu oraz projektowania eksperymentu, przyczynia się do optymalizacji zarządzania jakością w procesach produkcyjnych poprzez identyfikację oraz skuteczną kontrolę głównych źródeł zmienności.*

Przeprowadzona analiza wykazała, że zastosowanie podejścia pozwala na skuteczne zminimalizowanie wpływu niepożądanych odchyłeń w procesie, zwiększając stabilność oraz przewidywalność wpływu poszczególnych czynników kształtujących zmienność naturalną. Zasada Pareto umożliwia priorytetyzację działań poprzez wskazanie kluczowych elementów wpływających na jakość – budujących zmienność. Dodanie do niej metod SPC i DoE tworzy spójny, wzajemnie uzupełniający się model, wspierający monitorowanie kluczowych parametrów, a także usprawniający podejmowanie decyzji optymalizacyjnych, co przekłada się na wyższą skuteczność oraz redukcję strat produkcyjnych.

Badania przeprowadzone w niniejszej rozprawie doktorskiej potwierdzają zasadność hipotezy 2: *Rozdzielczość, precyzja systemu pomiarowego oraz zastępowalność operatorów prowadzą do poprawy trafności podejmowanych decyzji.*

Wykazano, że odpowiednia rozdzielczość systemu pomiarowego, precyzja oraz zastępowalność operatorów determinują wiarygodność wyników, co bezpośrednio przekłada się na trafność decyzji jakościowych. Ograniczenia w systemach pomiarowych mogą prowadzić do błędnej identyfikacji źródeł zmienności, powodując istotne konsekwencje.

W celu pogłębienia analizy sformułowano pytania badawcze ukierunkowane na aspekty, które nie zostały dostatecznie opisane w literaturze, co pozwoliło na uzupełnienie zidentyfikowanych luk w wiedzy.

1) *Jakie jest oddziaływanie w ujęciu zastosowania zasady Pareto w zintegrowanym modelu statystycznej kontroli procesu i projektowaniu eksperymentu na identyfikację kluczowych czynników budujących jakość produktów w procesie produkcyjnym?*

W pracy doktorskiej przeprowadzono analizę wpływu zasady Pareto w połączeniu ze statystyczną kontrolą procesu oraz projektowaniem eksperymentu na identyfikację istotnych czynników jakościowych w procesie produkcyjnym. Wyniki badań potwierdziły, że zastosowane podejście pozwala na skuteczne określenie dominujących

źródeł zmienności i hierarchizację czynników mających istotny wpływ na jakość produktu. Integracja metod SPC i DoE umożliwiła kontrolę parametrów procesowych, a także równoległą optymalizację czynników, co przyczyniło się do zminimalizowania zmienności i poprawy stabilności procesu. Wykazano, że podejście oparte na zasadzie Pareto wspiera podejmowanie decyzji jakościowych, pozwalając na skuteczniejsze działania optymalizacyjne wynikające z założeń SPC i DoE.

2) Jakie są różnice w skuteczności eksperymentu pełnoczynnikowego oraz frakcjonowanego w warstwie identyfikacji czynników wpływających na jakość produktów?

Przeprowadzona analiza wykazała, że eksperyment pełnoczynnikowy umożliwia kompleksową ocenę wszystkich czynników i ich interakcji w kontekście odpowiedzi układu, jednak jego zastosowanie wiąże się z większymi nakładami czasowymi i finansowymi. Eksperyment frakcjonowany pozwala natomiast ograniczyć liczbę przebiegów, zachowując istotne informacje o efektach głównych, choć wiąże się z aliasowaniem. Wybór odpowiedniego eksperymentu zależy od specyfiki badania oraz dostępnych zasobów. Odpowiednio zaprojektowany eksperyment frakcjonowany pozwala skutecznie identyfikować kluczowe czynniki przy mniejszych nakładach.

3) Jakie znaczenie dla jakości ma odpowiednia identyfikacja rodzaju zmienności procesu?

Badania przeprowadzone w niniejszej analizie podkreślają znaczenie właściwej identyfikacji rodzaju zmienności procesu w obszarze jakości wytwarzanych produktów. Rozróżnienie zmienności naturalnej i specjalnej stanowi istotny element skutecznego zarządzania. Zmienność specjalna, wynikająca z przyczyn zewnętrznych, wymaga natychmiastowego działania, podczas gdy zmienność naturalna, będąca nieodłącznym elementem każdego procesu, opiera się na zrozumieniu ciągu przyczynowo-skutkowego. Błędna interpretacja może prowadzić do przeregulowania procesu, zwiększając jego niestabilność.

4) Jak rozdzielczość systemu pomiarowego oraz precyzja laborantów wpływają na wiarygodność wyników pomiarowych w zarządzaniu jakością?

W pracy doktorskiej potwierdzono, że rozdzielczość systemu pomiarowego i precyzja laborantów bezpośrednio wpływają na wiarygodność wyników, przekładając się na jakość zarządzania procesem. Odpowiednia rozdzielczość pozwala wykryć nawet niewielkie odchylenia, co umożliwia rozróżnienie zmienności i skuteczną kontrolę.

Precyzja laborantów, obejmująca powtarzalność, zapewnia spójność uzyskiwanych wyników. Badania wykazały, że niewystarczająca rozdzielczość oraz niska precyzja mogą prowadzić do błędnych interpretacji, skutkując działaniami nieadekwatnymi do rzeczywistego stanu procesu.

5) *Jakie są ograniczenia dla wskaźników zdolności potencjalnej procesu: process capability (Cp), process performance (Pp) oraz wskaźników zdolności rzeczywistej: process capability index (Cpk), process performance index (Ppk) w warstwie zarządzania jakością i ich wpływ na doskonalenie procesów produkcyjnych?*

Analiza przeprowadzona w niniejszej pracy wykazała, że wskaźniki zdolności procesu charakteryzują istotne ograniczenia, które mogą prowadzić do niewłaściwej interpretacji parametrów procesowych. Opierają się one wyłącznie na specyfikacji, która nie odzwierciedla rzeczywistego głosu procesu, lecz jedynie określa, czy wyniki mieszczą się w przyjętych granicach. Ponadto wskaźniki nie dostarczają informacji o rodzaju zmienności, przez co ich interpretacja może prowadzić do błędnych decyzji i utrudniać ocenę, czy proces znajduje się pod kontrolą statystyczną. Uwzględniając powyższe uwarunkowania, dochodzimy do przekonania, że analizowane wskaźniki nie powinny być stosowane jako samodzielne narzędzie oceny, lecz uzupełniane o narzędzia takie jak karty kontrolne, które umożliwiają analizę rzeczywistej stabilności i zmienności procesu.

Struktura pracy została podzielona na dwie główne części: teoretyczną i empiryczną. Część pierwsza obejmuje szeroką charakterystykę strategii ciągłego doskonalenia, definicję i rolę jakości, a także znaczenie zasady Pareto. Ponadto przedstawiono narzędzia statystycznej kontroli procesu, stanowiące podstawę teoretyczną w zakresie opisywanego modelu. Z kolei część empiryczna pracy została ukierunkowana na wypełnienie luki badawczej, zidentyfikowanej we wstępie, poprzez implementację oraz analizę skuteczności integralnego modelu z zastosowaniem zasady Pareto w ramach realizowanego studium przypadku.

Wdrożenie założeń SPC w analizie DoE znacząco zwiększyło skuteczność działań, prowadząc do trafniejszych wniosków oraz wskazując parametry w największym stopniu minimalizujące zmienność procesu.

Należy jednak podkreślić, że implementując integralny model SPC i DoE wraz z zasadą Pareto, trzeba uwzględnić jego holistyczny charakter. Stosowanie każdego z elementów osobno może prowadzić do pominięcia ważnych aspektów lub istotnych

czynników wpływających na ostateczne wnioski. W niniejszej pracy skuteczność podejścia przeanalizowano w odniesieniu do pojedynczego procesu, co oznacza, że ekstrapolacja wszystkich założeń i wniosków na inne obszary może nie przynieść oczekiwanych rezultatów.

Model charakteryzuje się także ograniczeniami, wśród których należy wymienić konieczność wystąpienia normalnego rozkładu analizowanych danych. Jego brak wpływa na skuteczność i dokładność działania SPC. Istotnym utrudnieniem jest również ograniczona czułość standardowych kart kontrolnych Shewharta w wykrywaniu niewielkich lub stopniowych zmian w procesie. Kolejnym ograniczeniem jest złożoność, która rośnie wraz z liczbą badanych czynników, utrudniając opracowanie planów i analizę wyników w DoE. Dodatkowo pomijanie wiedzy procesowej na rzecz wyłącznie statystycznych metod może skutkować błędnymi decyzjami, zwłaszcza w przypadku złożonych interakcji. Jakość i kompletność danych, a także kultura organizacyjna odgrywają równie istotną rolę – w przedsiębiorstwach nastawionych na ciągłe doskonalenie wdrożenie prezentowanego modelu może być łatwiejsze i bardziej efektywne⁴²⁶.

Badania dotyczące dalszego rozwoju modelu łączącego SPC, DoE i zasadę Pareto powinny koncentrować się na opracowaniu uniwersalnego podejścia matematycznego do zastosowania kart kontrolnych, pozwalającego na ich skuteczne wykorzystanie niezależnie od rozkładu analizowanych danych. Rozwiązanie umożliwiłoby szerokie zastosowanie modelu bez względu na specyfikę realizowanych procesów.

Kolejnym ważnym kierunkiem badań jest stworzenie narzędzi zdolnych do jednoczesnego wykrywania zarówno niewielkich przesunięć w procesie, jak i dużych odchyleń, co pozwoliłoby na unifikację stosowanych podejść.

Istnieje również możliwość zastosowania zaproponowanego modelu do opracowania systemów adaptacyjnych, które automatycznie uczą się i reagują na zmieniające się warunki, bez konieczności ingerencji operatora. Pozwoliłoby to na elastyczne podejmowanie działań ukierunkowanych na redukcję zmienności i optymalizację procesów w czasie rzeczywistym, co mogłoby stanowić przyszłość zarządzania jakością, łącząc analitykę, automatyzację oraz dynamiczne podejmowanie decyzji – korespondując z technologiami wpisanymi w obszar Przemysłu 4.0. Włączenie

⁴²⁶ Ł. Sułkowski, *Kultura jakości w zarządzaniu, czyli pomiędzy tożsamością a kulturą organizacyjną*, „Przedsiębiorczość i Zarządzanie” 2013, t. 14, z. 8, s. 25–37.

sztucznej inteligencji czy choćby uczenia maszynowego w analizę danych procesowych może dodatkowo wesprzeć podejmowanie decyzji w warstwie jakościowej.

Ponieważ dotychczasowe badania skupiały się na produkcji farby jednoskładnikowej, istotne jest zweryfikowanie skuteczności modelu i zasady Pareto w innych branżach, co pozwoliłoby zidentyfikować uniwersalne elementy i ograniczenia w różnych środowiskach przemysłowych.

Ważną perspektywą dla przyszłych badań pozostaje też ocena opłacalności rozwijania i wdrażania integralnego modelu SPC, DoE i zasady Pareto, zwłaszcza w kontekście małych oraz średnich przedsiębiorstw.

Dodatkowo należy uwzględnić wymagania zrównoważonego rozwoju, rozszerzając model o mechanizmy oceny wpływu na środowisko, w tym ograniczenie śladu węglowego i efektywne zarządzanie zasobami, co może mieć znaczący wpływ na długoterminową konkurencyjność przedsiębiorstw oraz ich zdolność do spełniania rosnących oczekiwań społecznych czy regulacyjnych w zakresie ochrony środowiska⁴²⁷.

Rozwiązanie opracowane w ramach niniejszej dysertacji stanowi innowacyjne podejście w obszarze zidentyfikowanej luki badawczej. Model SPC i DoE z równoległym wykorzystaniem zasady Pareto łączy solidne podstawy teoretyczne z praktycznymi rozwiązaniami, wprowadzając nowatorskie podejście do zarządzania jakością procesów produkcyjnych. W efekcie zastosowania przedstawionego rozwiązania możliwe było przeprowadzenie wnikliwej analizy procesu opartej na uporządkowanym i przemysłowym ciągu działań, co potwierdziło jego skuteczność w praktycznym zastosowaniu.

⁴²⁷ A. Kwilinski, O. Lyulyov, T. Pimonenko, *The role of green finance in attaining environmental sustainability within a country's ESG performance*, „Journal of Innovation & Knowledge” 2025, vol. 10, no. 2, 100674.

BIBLIOGRAFIA

- Abbas N., Riaz M., Does R.J., *Mixed exponentially weighted moving average – cumulative sum charts for process monitoring*, „Quality and Reliability Engineering International” 2013, s. 345–356.
- Abbasi S.A., Miller A., *On proper choice of variability control chart for normal and non-normal processes*, „Quality and Reliability Engineering International” 2012, vol. 28, no. 3, s. 279–296.
- Abolhassani A., Layfield K., Gopalakrishnan B., *Lean and US manufacturing industry: popularity of practices and implementation barriers*, „International Journal of Productivity and Performance Management” 2016, vol. 65, no. 7, s. 875–897.
- Adawiyah W., Pramuka B., Sholikhah Z., *Deming’s Quality Management Practices by Small Businesses in Rural Areas*, „SHS Web of Conferences” 2020, vol. 86, 01030.
- Addeh J., Ebrahimzadeh A., Azarbad M., Ranaee V., *Statistical process control using optimized neural networks: A case study*, „ISA transactions” 2014, vol. 53, no. 5, s. 1489–1499.
- Adeleke A.K., *Intelligent monitoring system for real-time optimization of ultra-precision manufacturing processes*, „Engineering Science & Technology Journal” 2024, vol. 5, no. 3, s. 803–810.
- Adib K., Mazouzi M., Elyoussoufi S., *Investigation of annual trucks fatal accidents in El Hajeb province of Morocco using TRIZ-Ishikawa diagram*, „Heliyon” 2024, vol. 10, no. 4, e26295.
- Ahmad A., Subramanian T., Panteliadis P., Wilson-Macdonald J., Rothenfluh D., Nnadi C., *Quantifying the ‘Law of Diminishing Returns’ in Magnetically Controlled Growing Rods C.*, „Spine Deformity” 2017, vol. 5, 452.
- Ahmad T., Akhtar M., *Efficient response surface designs for the second-order multivariate polynomial model robust to missing observation*, „Journal of Statistical Theory and Practice” 2015, vol. 9, s. 361–375.
- Ahmed S., Mohammed A.F., *From process flows to benchmark in an accident and emergency hospital with PERT approach*, „Kybernetes” 2019, vol. 48, no. 3, s. 520–545.
- Akdere M., *The role of knowledge management in quality management practices: achieving performance excellence in organizations*, „Advances in Developing Human Resources” 2009, vol. 11, no. 3, s. 349–361.
- Alagić I., *Minitab Application as Statistical Tool for Lean Six Sigma*, w: *International Conference – New Technologies, Development and Applications*, 2021, s. 422–430.
- Ali S., Abbas Z., Nazir H.Z., Riaz M., Li Y., *On developing sensitive nonparametric mixed control charts with application to manufacturing industry*, „Quality and Reliability Engineering International” 2021, vol. 37, no. 6, s. 2699–2723.
- Aljohani A., *Predictive analytics and machine learning for real-time supply chain risk mitigation and agility*, „Sustainability” 2023, vol. 15, no. 20, 15088.
- Alkiayat M., *A Practical Guide to Creating a Pareto Chart as a Quality Improvement Tool*, „Global Journal on Quality and Safety in Healthcare” 2021, vol. 4, no. 2, s. 83–84.

- Al-Refaie A., Bata N., *Evaluating measurement and process capabilities by GR&R with four quality measures*, „Measurement” 2010, vol. 43, no. 6, s. 842–851.
- Alsughayir A., *Barriers to TQM implementation within a private medical services organizations in Saudi Arabia*, „International Journal of Business Administration” 2014, vol. 5, no. 3, s. 117–121.
- Ambrosini V., Bowman C., *Surfacing tacit sources of success*, „International Small Business Journal” 2008, vol. 26, no. 4, s. 403–431.
- Andersen H.B., Pawlowski C.S., Scheller H.B., Troelsen J., Toftager M., Schipperijn J., *Activating schoolyards: study design of a quasi-experimental schoolyard intervention study*, „BMC Public Health” 2015, vol. 15, no. 1, s. 1–10.
- Anderson M.J., Whitcomb P.J., *DOE simplified: Practical tools for effective experimentation*, CRC Press, 2015, s. 1–268.
- Angelopoulos M.K., Pollalis Y.A., *Change Management via Data Analytics for a Successful Lean Transformation of Public Companies*, „Archives of Business Research” 2021, vol. 9, no. 12.
- Anguo X., *The Conception of Quality in Marketing*, „Journal of Gansu Radio & Tv University” 2004, vol. 14, no. 4, s. 23–26.
- Anil Kumar S., *Knowledge based selection in Soft Computing Models using Pareto Charts and Pareto Principle*, „International Journal of Research in Engineering and Technology” 2016, vol. 5, s. 1–10.
- Anis M.Z., *Basic process capability indices: an expository review*, „International Statistical Review” 2008, vol. 76, no. 3, s. 347–367.
- Antony J., *Some pros and cons of Six Sigma: an academic perspective*, „The TQM Magazine” 2004, vol. 16, no. 4, s. 303–306.
- Aoki S., Takemura A., *Design and analysis of fractional factorial experiments from the viewpoint of computational algebraic statistics*, „Journal of Statistical Theory and Practice” 2012, vol. 6, no. 1, s. 147–161.
- Arunagiri P., Gnanavelbabu A., *Identification of major lean waste and its contributing factors using the fuzzy analytical hierarchy process*, „Transactions of the Canadian Society for Mechanical Engineering” 2016, vol. 40, no. 3, s. 371–382.
- Assareh H., Waterhouse M., Moser C., Brighthouse R., Foster K.A., Smith I., Mengersen K., *Data quality improvement in clinical databases using statistical quality control: Review and case study*, „Therapeutic Innovation & Regulatory Science” 2013, vol. 47, no. 1, s. 70–81.
- Automotive Industry Action Group, *Measurement Systems Analysis (MSA) Reference Manual*, AIAG, 2010, s. 1–227.
- Azouza O.I., Masaud K.A.R., *Production Process Management on Quality Control in The Iron and Steel Industry in Libya*, „American Journal of Economics and Business Innovation” 2023, vol. 2, no. 3, s. 25–31.
- Babiak I., Brzuska E., Perkowski J., *Fractional factorial design of screening experiments on cryopreservation of fish sperm*, „Aquaculture Research” 2000, vol. 31, no. 3, s. 273–282.
- Bäckström I., Larsson J., Wiklund H., *Are healthy and successful organizations working accordingly to quality management?*, „International Journal of Workplace Health Management” 2009, vol. 2, no. 3, s. 245–257.
- Bañuelas R., Antony J., Brace M., *An application of Six Sigma to reduce waste*, „Quality and Reliability Engineering International” 2005, vol. 21, no. 6, s. 553–570.

- Baran E., Korkusuz Polat T., *Classification of Industry 4.0 for Total Quality Management: A review*, „Sustainability” 2022, vol. 14, no. 6, 3329.
- Barros de C., Aranha N., Severino P., Souto E.B., Zielińska A., Lopes A., Rios A., Batain F., Crescendio K., Chaud M., Alves T., *Quality by Design Approach for the Development of Liposome Carrying Ghrelin for Intranasal Administration*, „Pharmaceutics” 2021, vol. 13, no. 5, 686.
- Barroso W.J.S., Alencar D.B.D., Costa A.P.T., Sanches A.E., *Implementation of 5S Program in a Building Site of a Predial Reform in Manaus City*, „International Journal for Innovation Education and Research” 2019, vol. 7, no. 11, s. 837–849.
- Barsalou M., Grabowska M., Perkin R., *Inquiry into the Effectiveness of Eight Discipline-Based Problem-Solving*, „Quality Innovation Prosperity” 2023, vol. 27, no. 2, s. 61–76.
- Bawa S., Attah P.K., Agougil A., El Harch M., *Impact of Knowledge Management on Firms' Innovation Performance*, „Technology and Investment” 2023, vol. 14, no. 4, s. 293–328.
- Beier G., Niehoff S., Xue B., *More sustainability in Industry through industrial Internet of Things?*, „Applied Sciences” 2018, vol. 8, no. 2, 219.
- Belás J.D.J., Strnad Z., Valášková K., Čera G., *Improvement of the quality of business environment model: Case of the SME segment*, „Engineering Economics” 2019, vol. 30, no. 5, s. 601–611.
- Benneyan J.C., *Statistical process control as a tool for research and healthcare improvement*, „Quality and Safety in Health Care” 2003, vol. 12, no. 6, s. 458–464.
- Bergs T., Hermann L., Rey J., Barth S., *Methodology for the identification of alternative manufacturing changes for safety-critical components*, „Production Engineering” 2020, vol. 14, s. 297–307.
- Bisgaard S., *Quality management and Juran's legacy*, „Quality and Reliability Engineering International” 2007, vol. 23, no. 6, s. 665–677.
- Blanco-Encomienda F., Rosillo-Díaz E., Muñoz-Rosas J., *Importance of Quality Control Implementation in the Production Process of a Company*, „European Journal of Economics and Business Studies” 2018, vol. 4, s. 240–244.
- Bogo A.B., Henning E., Kalbusch A., *Statistical parametric and non-parametric control charts for monitoring residential water consumption*, „Scientific Reports” 2023, vol. 13, no. 1, 13543.
- Bommier A., Zuber S., *The Pareto principle of optimal inequality*, „International Economic Review” 2012, vol. 53, no. 2, s. 593–608.
- Boroiu A.A., Titu A.M., Boroiu A., Dragomir M., Pop A.B., Titu S., *The Influence of Sample Size on Long-Term Performance of a 6σ Process*, „Processes” 2023, vol. 11, no. 3, 779.
- Bottani E., Montanari R., Volpi A., Tebaldi L., Di Maria G., *Statistical Process Control of assembly lines in a manufacturing plant: Process Capability assessment*, „Procedia Computer Science” 2021, vol. 180, s. 1024–1033.
- Brege H., *Exploring Proactive Market Strategies: Managing the Market to Create Value*, Linköping University Electronic Press, 2018, s. 1–87.
- Browne R.P., MacKay R.J., Steiner S.H., *Leveraged Gauge R&R Studies*, „Technometrics” 2010, vol. 52, no. 3, s. 294–302.
- Brue S., *Retrospectives The Law of Diminishing Returns*, „Journal of Economic Perspectives” 1993, vol. 7, s. 185–192.

- Butt J., *A Conceptual Framework to Support Digital Transformation in Manufacturing Using an Integrated Business Process Management Approach*, „Designs” 2020, vol. 4, no. 3, 17.
- Cai Z., Parker S.K., Chen Z., Lam W., *How does the social context fuel the proactive fire? A multilevel review and theoretical synthesis*, „Journal of Organizational Behavior” 2019, vol. 40, no. 2, s. 209–230.
- Chang L.C., *Rethinking the Project Management Process by Using Unified Modeling Language*, „International Journal of Information Technology Project Management” 2015, vol. 6, no. 3, s. 58–73.
- Chao M.T., Lin D.K., *Another Look at the Process Capability Index*, „Quality and Reliability Engineering International” 2006, vol. 22, no. 2, s. 153–163.
- Chaple A.P., Narkhede B.E., Akarte M., Raut R.D., *Modeling the lean barriers for successful lean implementation: TSIM approach*, „International Journal of Lean Six Sigma” 2018, vol. 12, no. 1, s. 98–119.
- Chaudhary A.M., Sanaullah A., Hanif M., Almazah M.M., Albasheir N.A., Al-Duais F.S., *Efficient Monitoring of a Parameter of Non-Normal Process Using a Robust Efficient Control Chart: A Comparative Study*, „Mathematics” 2023, vol. 11, no. 19, 4157.
- Chen H., Niu J., Shu G., Wan H., *Optimization Of Freeze-Dried Starter For Yogurt By Full Factorial Experimental Design*, „Acta Universitatis Cibiniensis. Series E: Food Technology” 2015, vol. 19, no. 2, s. 27–38.
- Chen K., Pearn W.L., Lin P.C., *Capability measures for processes with multiple characteristics*, „Quality and Reliability Engineering International” 2003, vol. 19, no. 2, s. 101–110.
- Chetter T.G., *Statistical process control part 2: using statistical process control to measure process improvement in patient flow*, „Australian Health Review” 2009, vol. 33, no. 3, s. 412–422.
- Chiem J.L., Donohue L.D., Martin L.D., Low D.K., *An Opioid-free Anesthesia Protocol for Pediatric Strabismus Surgery: A Quality Improvement Project*, „Pediatric Quality & Safety” 2021, vol. 6, no. 5, e462.
- Costa N., *Design of experiments—overcome hindrances and bad practices*, „The TQM Journal” 2019, vol. 31, no. 5, s. 772–789.
- Cp Cpk Pp Ppk and % out of tolerance, Develve.net, <https://develve.net/Cp%20Cpk%20%2525%20out%20of%20tolerance.html>, [dostęp: 1 kwietnia 2025].
- Craft R.C., Leake C., *The Pareto principle in organizational decision making*, „Management Decision” 2002, vol. 40, no. 8, s. 729–733.
- Czabak-Górska I.D., *The classification and characteristics of control charts*, „CBU International Conference Proceedings” 2017, vol. 5, s. 86–93.
- Dacko-Pikiewicz Z., Zabolotniaia M., Cheng Z., *Influence of leadership style on employees' innovative activity*, „Polish Journal of Management Studies” 2019, vol. 20, no. 1, s. 478–496.
- Danese P., Manfè V., Romano P., *A Systematic Literature Review on Recent Lean Research: State-of-the-art and Future Directions*, „International Journal of Management Reviews” 2017, vol. 20, no. 2, s. 579–605.
- Daniels L., Edgar B., Burdick R., Hubele N., *Using Confidence Intervals to Compare Process Capability Indices*, „Quality Engineering” 2024, vol. 17, s. 23–32.

- Dawda P., Raymond M., *Measurement for improvement*, „InnovAiT: Education and Inspiration for General Practice” 2017, vol. 10, no. 1, s. 51–56.
- De La Vara J.L., Wnuk K., Berntsson-Svensson R., Sánchez J., Regnell B., *An Empirical Study on the Importance of Quality Requirements in Industry*, w: *23rd International Conference on Software Engineering and Knowledge Engineering (SEKE 2011)*, 2011, s. 438–443.
- De León G., Grima P., Tort-Martorell X., *Selecting control factor values in a robust design using a scatter plot*, „Quality and Reliability Engineering International” 2011, vol. 27, no. 4, s. 489–497.
- Deligiannakis A., Roussopoulos N., *Extended wavelets for multiple measures*, w: *Proceedings of the 2003 ACM SIGMOD international conference on Management of data*, 2003, s. 229–240.
- Deming W.E., *Out of the Crisis*, The MIT Press, 2018, s. 17–82.
- Demir A., Sertbaş K., *Total quality management applications in sports and an application on Kocaeli amateur sports club federation sports clubs*, „SHS Web of Conferences” 2018, vol. 48, 01018.
- Dever J., Mazzuchi T.A., Sarkani S., Mihalcin M.J., Loewenthal A., *The Applicability of Statistical Process Control to Systems Involving People Processes and Business Rhythms*, „Systems Engineering” 2014, vol. 17, no. 2, s. 193–203.
- Dewi S.K., *Minimasi defect produk dengan konsep Six Sigma*, „Jurnal Teknik Industri” 2012, vol. 13, no. 1, s. 43–50.
- Dichev D., Koev H., Bakalová T., Louda P., *An algorithm for improving the accuracy of systems measuring parameters of moving objects*, „Metrology and Measurement Systems” 2016, vol. 23, no. 4, s. 555–565.
- Diering M., Hamrol A., Kujawińska A., *Measurement System Analysis Combined with Shewhart's Approach*, „Key Engineering Materials” 2015, vol. 637, s. 7–11.
- Dieste M., Panizzolo R., Garza-Reyes J.A., Anosike A., *The relationship between lean and environmental performance: Practices and measures*, „Journal of Cleaner Production” 2019, vol. 224, s. 120–131.
- Dixit A.K., Awasthi R., *EDM process parameters optimization for Al-TiO₂ Nano Composite*, „International Journal of Materials Forming and Machining Processes” 2015, vol. 2, no. 2, s. 17–30.
- Dogan O., Areta Hizirolu O., *Empowering Manufacturing Environments with Process Mining-Based Statistical Process Control*, „Machines” 2024, vol. 12, no. 6, 411.
- Dong Z., Zhang Z., *Does the Business Environment Improve the Sustainable Development of Enterprises?*, „Sustainability” 2022, vol. 14, no. 20, 13499.
- Donthu N., Kumar S., Mukherjee D., Pandey N., Lim W., *How to conduct a bibliometric analysis: An overview and guidelines*, „Journal of Business Research” 2021, vol. 133, s. 285–296.
- Douglas J.A., Antony J., Douglas A., *Waste identification and elimination in HEIs: the role of Lean thinking*, „International Journal of Quality & Reliability Management” 2015, vol. 32, no. 9, s. 970–981.
- Douthwaite J.A., Lesage B., Gleirscher M., Calinescu R., Aitken J.M., Alexander R., Law J., *A Modular Digital Twinning Framework for Safety Assurance of Collaborative Robotics*, „Frontiers in Robotics and AI” 2021, vol. 8, 758099.

- Du X., Gai J., Chen C., *Condition-Based Maintenance Optimization for Motorized Spindles Integrating Proportional Hazard Model with SPC Charts*, „Mathematical Problems in Engineering” 2020, vol. 2020, no. 1, s. 1–11.
- Durakovic B., Basic H., *Continuous Quality Improvement in Textile Processing by Statistical Process Control Tools: A Case Study of Medium-Sized Company*, „Periodicals of Engineering and Natural Sciences” 2013, vol. 1, no. 1, s. 39–46.
- Dvorský J., Belás J., Novotná I., Fero M., Petráková Z., *Quality of Business Environment of the SME: A Sectoral View*, „Communications – Scientific Letters of the University of Zilina” 2020, vol. 22, no. 4, s. 163–172.
- Dyrektywa Delegowana Komisji (UE) 2023/2775 z dnia 17 października 2023 r, https://eur-lex.europa.eu/legal-content/PL/TXT/?uri=OJ%3AL_202302775.
- Dziendziara J., Smolarek M., *Innovation 4.0 in developing SME strategy*, w: *Sustainability, Technology and Innovation 4.0*, pod red. nauk. Z. Makięły, M.M. Stuss, R. Borowieckiego, Routledge, London 2021, s. 141–160.
- Eck N., Waltman L., *Software survey: VOSviewer: A computer program for bibliometric mapping*, „Scientometrics” 2009, vol. 84, s. 523–538.
- Elhuni R.M., Ahmad M.M., *Investigating the total quality elements based on Deming management model in oil industry in Libya – an empirical study*, „International Journal of Productivity and Quality Management” 2014, vol. 13, no. 2, s. 142–156.
- Engwall M., *PERT, Polaris, and the realities of project execution*, „International Journal of Managing Projects in Business” 2012, vol. 5, no. 4, s. 595–616.
- Fazeli A.R., Tashnizi E.S., *Statistical Control and Investigation of Capability of Process and Machine in Wire Cut EDM Process of Gas Turbine Blade Airfoil Tip*, „Engineering” 2011, vol. 3, no. 3, s. 260–265.
- Fichtinger J., Chan C., Yates N.E., *A joint network design and multi-echelon inventory optimisation approach for supply chain segmentation*, „International Journal of Production Economics” 2019, vol. 209, s. 103–111.
- Filho W.M.M., Gonçalves C.A., Rodrigues H.A., Coelho I.R., *Applying the seven basic quality tools to solve a quality issue in the manufacturing of electronic switches*, „Journal of Engineering Research” 2023, vol. 3, no. 20, s. 2–22.
- Filz M.A., Bosse J.P., Herrmann C., *Digitalization platform for data-driven quality management in multi-stage manufacturing systems*, „Journal of Intelligent Manufacturing” 2023, vol. 35, no. 6, s. 2699–2718.
- Fireescu V., Popescu J., *The Costs of Quality: An Important Decision Tool*, „Journal of Economics and Business Administration” 2015, vol. 3, no. 4, s. 44–52.
- Fisher C., Elrod C.C., Mehta R., *A replication to validate and improve a measurement instrument for Deming’s 14 Points*, „International Journal of Quality & Reliability Management” 2011, vol. 28, no. 3, s. 328–358.
- Flynn M., *Regression analysis of automated measurement systems*, w: *IEEE Autotestcon, Salt Lake City, UT, Sep. 8-11, 2008*, s. 536–542.
- Fogarty G., Stankov L., *Challenging the ‘Law of diminishing returns’*, „Intelligence” 1995, vol. 21, s. 157–174.
- Forte E., von Harbou E., Burger J., Aspiron N., Bortz M., *Optimal Design of Laboratory and Pilot-Plant Experiments Using Multiobjective Optimization*, „Chemie Ingenieur Technik” 2017, vol. 89, no. 5, s. 645–654.

- Fotopoulos C., Kafetzopoulos D., Gotzamani K., *Critical factors for effective implementation of the HACCP system: a Pareto analysis*, „British Food Journal” 2011, vol. 113, no. 5, s. 578–597.
- Frei R., Jack L., Krzyzaniak S.A., *Mapping Product Returns Processes in Multichannel Retailing: Challenges and Opportunities*, „Sustainability” 2022, vol. 14, no. 3, 1382.
- Freitas R.D.C., Freitas M.D.C.D., Gomes de Menezes G., Odorczyk R.S., *Lean Office contributions for organizational learning*, „Journal of Organizational Change Management” 2018, vol. 31, no. 5, s. 1027–1039.
- Gaikwad L., Sunnapwar V.K., *An integrated Lean, Green and Six Sigma strategies: A systematic literature review and directions for future research*, „The TQM Journal” 2020, vol. 32, no. 2, s. 201–225.
- Gao X., Li C., Elahi E., Abro M.I., Cui Z., *Technological Innovation, Product Quality and Upgrading of Manufacturing Value Chain: Empirical Evidence from China*, „Sustainability” 2023, vol. 15, no. 9, 7289.
- Gershengorn H.B., Kocher R., Factor P., *Management strategies to effect change in intensive care units: lessons from the world of business*, „Annals of the American Thoracic Society” 2014, vol. 11, no. 3, s. 444–453.
- Ghanbarian S., Kahforoushan D., Sahraei E., *Determination of significant factors in the removal of Cu (II) from aqueous solutions by applying adsorption method: using factorial design*, „Desalination and Water Treatment” 2016, vol. 57, no. 18, s. 8470–8479.
- Gijo E., Scaria J., Antony J., *Application of Six Sigma methodology to reduce defects of a grinding process*, „Quality and Reliability Engineering International” 2011, vol. 27, no. 8, s. 1221–1234.
- Greber T., *Analiza systemu pomiarowego (MSA)*, StatSoft, 2002, s. 31–38.
- Grice J.V., Montgomery D.C., *Design and Analysis of Experiments*, „Technometrics” 2000, vol. 42, no. 2, s. 208–209.
- Gross-Golacka E., Kupczyk T., Siuta-Tokarska B., Dzieńdziora J., *Integration of intellectual capital, sustainable development, and Business 5.0, w: Innovation in the Digital Economy*, pod red. A. Rzepki, Routledge, London 2023, s. 135–148.
- Grzegorzewski P., *Statistical tests for comparing Pareto Charts*, „Communications in Numerical Analysis” 2012, s. 1–12.
- Grznár P., Burganová N., Mozol Š., Mozolová L., *A Comprehensive Digital Model Approach for Adaptive Manufacturing Systems*, „Applied Sciences” 2023, vol. 13, no. 19, 10706.
- Gunst R.F., Mason R.L., *Fractional factorial design*, „Wiley Interdisciplinary Reviews: Computational Statistics” 2009, vol. 1, no. 2, s. 234–244.
- Gupta M., Kaplan H.C., *Using Statistical Process Control to Drive Improvement in Neonatal Care*, „Clinics in Perinatology” 2017, vol. 44, no. 3, s. 627–644.
- Hadiyanto H., Sitepu E., *Statistical Process Control (SPC) Implementation in Manufacturing Industry to Improve Quality Performance: A Prisma Systematic Literature Review and Meta Analysis*, „E3S Web of Conferences” 2023, vol. 426, 01066.
- Hamja A., Hasle P., Hansen D., *Transfer mechanisms for lean implementation with OHS integration in the garment industry*, „International Journal of Productivity and Performance Management” 2021, s. 3534–3555.

- Handayani N., Mustikasari A., Hutagalung S., Monica B., *Analysis of implementation of ISO 9001:2015 in SME Aldin Natural Home*, w: *International Conference with 5th ACISE (Annual Conference on Industrial and System Engineering) and World Standard Cooperation Academic Day*, 2018.
- Hardy D.L., Kundu S., Latif M., *Productivity and process performance in a manual trimming cell exploiting Lean Six Sigma (LSS) DMAIC – a case study in laminated panel production*, „International Journal of Quality & Reliability Management” 2021, vol. 38, no. 9, s. 1861–1879.
- Hariharasudan A., Kot S., *A scoping review on Digital English and Education 4.0 for Industry 4.0*, „Social Sciences” 2018, vol. 7, no. 11, s. 227.
- Harper K.C., Sigman M.S., *Predicting and optimizing asymmetric catalyst performance using the principles of experimental design and steric parameters*, „Proceedings of the National Academy of Sciences” 2011, vol. 108, no. 6, s. 2179–2183.
- Hasan T., *Doctors or technicians: assessing quality of medical education*, „Advances in Medical Education and Practice” 2010, vol. 1, s. 25.
- Hästbacka D., Kannisto P., Vilkkio M., *Data-driven and Event-driven Integration Architecture for Plant-wide Industrial Process Monitoring and Control*, w: *IECON 2018–44th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society*, 2018, s. 2979–2985.
- Hermann M., Bücker I., Otto B., *Industrie 4.0 process transformation: findings from a case study in automotive logistics*, „Journal of Manufacturing Technology Management” 2020, vol. 31, no. 5, s. 935–953.
- Hong J., Zhou Z., Li X., Lau K.H., *Supply chain quality management and firm performance in China's food industry – the moderating role of social co-regulation*, „International Journal of Logistics Management” 2020, vol. 31, no. 1, s. 99–122.
- Hoque I., Maalouf M.M., Tanha M., Islam S., Alam M.Z., Sarker M., *Implementing and sustaining lean, buyer-supplier role, and COVID-19 pandemic: insights from the garment industry of Bangladesh*, „International Journal of Lean Six Sigma” 2023, vol. 14, no. 5, s. 1010–1034.
- Hortolà P., *An ergonomic format for short reporting in scientific journals using nested tables and the Deming's cycle*, „Journal of Information Science” 2007, vol. 34, no. 2, s. 207–212.
- Huang B., Yan J., Liu X.X.J., Wang J., Liu K., Xu Y., Peng G., *Research on Process Quality Prediction and Control of Spindle Housings in Flexible Production Lines*, „Applied Sciences” 2023, vol. 13, no. 14, 8371.
- Huang C., Chen K., Sheu S., Hsu T., *Enhancement of Axle Bearing Quality in Sewing Machines Using Six Sigma*, „Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture” 2010, vol. 224, no. 10, s. 1581–1590.
- Hughey A., *Application of the Deming Philosophy to Higher Education*, „Industry and Higher Education” 2000, vol. 14, s. 40–44.
- Hunold S., *How to apply Six Sigma to revenue management*, „Journal of Revenue and Pricing Management” 2013, vol. 13, no. 1, s. 23–34.
- Huq Z., *Managing change: a barrier to TQM implementation in service industries*, „Managing Service Quality: An International Journal” 2005, vol. 15, no. 5, s. 452–469.

- Irfan M., Mushtaq Q., Tabssum F., Shakir H.A., Qazi J.I., *Carboxymethyl cellulase production optimization from newly isolated thermophilic Bacillus subtilis K-18 for saccharification using response surface methodology*, „Amb Express” 2017, vol. 7, s. 1–9.
- Ismail F., Pawero A.M.D., Umar M.I.A., *Improving Educational Quality through Optimizing the Potential of Educational Institutions in Indonesia*, „International Journal of Educational Research” 2021, vol. 2, no. 1, s. 41–46.
- Ivanov D., Sokolov B., Dolgui A., *Introduction to Scheduling in Industry 4.0 and Cloud Manufacturing Systems*, „Scheduling in Industry 4.0 and Cloud Manufacturing” 2020, vol. 289, s. 1–9.
- Jabnoun N., *Control processes for total quality management and quality assurance*, „Work Study” 2002, vol. 51, no. 4, s. 182–190.
- Jadhav J.R., Mantha S.S., Rane S.B., *Exploring barriers in Lean implementation*, „International Journal of Lean Six Sigma” 2014, vol. 5, no. 2, s. 122–148.
- Jadhav S.P., Sawant S.H., *Dry Sliding Behaviour Study of Novel Low-metallic Friction Materials by using DoE-Taguchi Method*, „International Journal of Engineering” 2024, vol. 37, no. 3, s. 452–459.
- Jagatheesaperumal S.K., Rahouti M., Ahmad K., Al-Fuqaha A., Guizani M., *The Duo of Artificial Intelligence and Big Data for Industry 4.0: Applications, Techniques, Challenges, and Future Research Directions*, „IEEE Internet of Things Journal” 2021, vol. 9, no. 15, s. 12861–12885.
- Jak powstają farby?*, 2018, Chemia i Biznes, <https://www.chemiaibiznes.com.pl/artykuly/jak-powstaja-farby>, [dostęp: 1 kwietnia 2025].
- James J.M., Taifa I.W., *Quality improvement of long oil alkyd (LOA) resin requirements in the formulation of Hi-gloss paints*, „International Journal of Quality & Reliability Management” 2023, vol. 40, no. 7, s. 1753–1776.
- Jaworski J., Kluz R., Trzepieciński T., *Research on Accuracy of Automatic System for Casting Measuring*, „Archives of Foundry Engineering” 2016, vol. 16, no. 3, s. 49–54.
- Jaynes J.D.X., Xu H., Wong W.K., Ho C.M., *Application of fractional factorial designs to study drug combinations*, „Statistics in Medicine” 2012, vol. 32, no. 2, s. 307–318.
- Judi H.M., Genasan D., Jenal R., *Quality Control Implementation in Manufacturing Companies: Motivating Factors and Challenges*, w: *Applications and Experiences of Quality Control*, pod red. nauk. O. Ivanova, IntechOpen, 2011, s. 495–508.
- Junquera B., Barba-Sánchez V., *Environmental Proactivity and Firms' Performance: Mediation Effect of Competitive Advantages in Spanish Wineries*, „Sustainability” 2018, vol. 10, no. 70, 2155.
- Juran J.M., *Juran on Leadership for Quality: An Executive Handbook*, „The Free Press” 1989, s. 28–80.
- Kafetzopoulos D.P., Psomas E.L., Gotzamani K.D., *The impact of quality management systems on the performance of manufacturing firms*, „International Journal of Quality & Reliability Management” 2015, vol. 32, no. 4, s. 381–399.
- Kang M., Um K., *Combining internal quality-oriented product design with external supplier involvement for enhancing operational performance: the moderating role of product modularity*, „Journal of Manufacturing Technology Management” 2023, vol. 34, no. 2, s. 337–358.

- Kannan K.S.P., Garad A., *Competencies of quality professionals in the era of industry 4.0: a case study of electronics manufacturer from Malaysia*, „International Journal of Quality & Reliability Management” 2020, vol. 38, no. 3, s. 839–871.
- Kaplan R.M., Ries A.L., *Quality of Life: Concept and Definition*, „Journal of Chronic Obstructive Pulmonary Disease” 2007, vol. 4, no. 3, s. 263–271.
- Karim A., Arif-Uz-Zaman K., *A methodology for effective implementation of lean strategies and its performance evaluation in manufacturing organizations*, „Business Process Management Journal” 2013, vol. 19, no. 1, s. 169–196.
- Kechagias J., Kitsakis K., Vaxevanidis N., *Comparison of Full versus Fractional Factorial Experimental Design for the prediction of Cutting Forces in Turning of a Titanium alloy: A case study*, „International Journal of Materials” 2017, vol. 4, s. 1–4.
- Ketelaere B.D., Mertens K., Mathijs F., Diaz D.S., Baerdemaeker J.D., *Nonstationarity in statistical process control – issues, cases, ideas*, „Applied Stochastic Models in Business and Industry” 2011, vol. 27, no. 4, s. 367–376.
- Khan A., Biggs T.C., Faoury M., *Improving the allocation of junior doctor resources using a Pareto analysis of pager activity*, „International Journal of Otorhinolaryngology and Head and Neck Surgery” 2018, vol. 5, no. 1, s. 1–4.
- Khan A.A., Laghari A.A., Shaikh Z.A., Dacko-Pikiewicz Z., Kot S., *Internet of Things (IoT) security with blockchain technology: A state-of-the-art review*, „IEEE Access” 2022, s. 122679–122695.
- Kharazishvili Y., Kwilinski A., *Methodology for determining the limit values of national security indicators using artificial intelligence methods*, „Virtual Economics” 2022, vol. 5, no. 4, s. 7–26.
- Kharub M., *Integrating the HACCP and SPC for hazard control and process improvement: a case of pharmaceutical industry*, „International Journal of Pharmaceutical and Healthcare Marketing” 2020, vol. 14, no. 4, s. 561–586.
- Khinvasara T., Ness S., Shankar A., *Leveraging AI for Enhanced Quality Assurance in Medical Device Manufacturing*, „Asian Journal of Research in Computer Science” 2024, vol. 17, no. 6, s. 13–35.
- Kim S.J., Kim K.S., Jang H., *Optimization of manufacturing parameters for a brake lining using Taguchi method*, „Journal of Materials Processing Technology” 2003, vol. 136, no. 1–3, s. 202–208.
- Kister A., Vovk V., Polcyn J., *Application of artificial intelligence in health care*, „Annales Universitatis Apulensis Series Oeconomica” 2023, vol. 25, no. 1, s. 107–116.
- Klein V.B., Todesco J.L., *COVID-19 crisis and SMEs responses: The role of digital transformation*, „Knowledge and Process Management” 2021, vol. 28, no. 2, s. 117–133.
- Knop K., *Managing and Improving the Drilling Process of Woodwork Furniture with the Use of SPC Tools*, „Manufacturing Technology” 2021, vol. 21, no. 4, s. 492–501.
- Knoth S., *Statistical process control*, praca doktorska, Humboldt-Universität zu Berlin, Wirtschaftswissenschaftliche Fakultät, 2005, s. 1–17.
- Korkmaz M., Özmetin C., Özmetin E., Ziyanak Ö., *Boron removal by coagulation using Al (OH) 3 and factorial optimization of data for boron mine wastewater*, „Balıkesir Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi” 2020, vol. 22, no. 2, s. 687–697.

- Koronacki J., *Metody statystycznego sterowania jakością*, w: *Statystyka w przemyśle. Seminarium firmy StatSoft. Statsoft Polska*, StatSoft, 1999, s. 15–26.
- Kose B.O., *Agile Business Analysis for Digital Transformation*, w: *Handbook of Research on Multidisciplinary Approaches to Entrepreneurship, Innovation, and ICTs*, pod. red. nauk. L.C. Carvalho, et al., IGI Global, 2021, s. 98–123.
- Kot S., *Sustainable supply chain management in small and medium enterprises*, „Sustainability” 2018, vol. 10, no. 4, 1143.
- Kovalev M.I., *Measuring Systems Application Analysis in Engineering*, w: *Advances in Automation: Proceedings of the International Russian Automation Conference*, 2020, s. 732–743.
- Kowalik K., *Diagram Ishikawy w teorii i praktyce zarządzania jakością*, „Archiwum Wiedzy Inżynierskiej” 2018, t. 3, s. 15–17.
- Kumar N., Noordin M., Saman M.Z.M., *Lean Production Weaknesses in Manufacturing Industry: A review*, „Applied Mechanics and Materials” 2015, vol. 735, s. 344–348.
- Kumar S., Dey S., Saha M., *Comparison between two generalized process capability indices for Burr XII distribution using bootstrap confidence intervals*, „Life Cycle Reliability and Safety Engineering” 2019, vol. 8, s. 347–355.
- Kurnia H., Setiawan S., Hamsal M., *Implementation of Statistical Process Control for Quality Control Cycle in the Various Industry in Indonesia: A Systematic Literature Review*, „Journal Operations Excellence: Journal of Applied Industrial Engineering” 2021, vol. 13, no. 2, s. 194–206.
- Kvam E., *Giga-Mapping and Knowledge of Boundary Object Theory in Sustainable Product Development*, w: *Proceedings of the 23rd International Conference on Engineering and Product Design Education*, 2021, s. 1–6.
- Kvasko A.V., Shenderivs'ka L., *Efficiency of the Enterprise's Operating Activity and Its Evaluation*, „Naukovyj visnyk Kherson s' koho derzhavnoho universytetu” 2022, vol. 46, s. 16–22.
- Kwilinski A., Kardas M., *Efficiency of Full and Fractional Factorial Designs in Quality Management: A Case Study on Identifying Key Adhesion Factors*, „Forum Scientiae Oeconomia” 2024, vol. 12, no. 3, s. 138–155.
- Kwilinski A., Kardas M., *Enhancing process stability and quality management: A comprehensive analysis of process capability indices*, „Virtual Economics” 2024, vol. 6, no. 4, s. 73–92.
- Kwilinski A., Kardas M., *The role of the Pareto principle in quality management within Industry 4.0: A comprehensive bibliometric analysis*, „Virtual Economics” 2024, vol. 7, no. 3, s. 7–24.
- Kwilinski A., Lyulyov O., Pimonenko T., *The role of green finance in attaining environmental sustainability within a country's ESG performance*, „Journal of Innovation & Knowledge” 2025, vol. 10, no. 2, 100674.
- Kwilinski A., *Mapping Global Research on Green Energy and Green Investment: A Comprehensive Bibliometric Study*, „Energies” 2024, vol. 17, no. 5, 1119.
- Kwilinski A., *Understanding the nonlinear effect of digital technology development on CO₂ reduction*, „Sustainable Development” 2024, vol. 32, no. 5, s. 5797–5811.
- Kwilinski A., Vyshnevskiy O., Dzwigol H., *Digitalization of the EU economies and people at risk of poverty or social exclusion*, „Journal of Risk and Financial Management” 2020, vol. 13, no. 7, 142.

- Kwiliński A., *The Relationship between Sustainable Development and Digital Transformation: Bibliometric Analysis*, „Virtual Economics” 2023, vol. 6, no. 3, s. 56–69.
- Lahidji B., Tucker W., *Continuous Quality Improvement as a Central Tenet of TQM: History and Current Status*, „Quality Innovation Prosperity” 2016, vol. 20, no. 2, s. 157–168.
- Laureani A., Antony J., *Leadership and Lean Six Sigma: a systematic literature review*, „Total Quality Management & Business Excellence” 2017, vol. 30, no. 1–2, s. 53–81.
- Lee M.F., *A Review on Intelligent Control Theory and Applications in Process Optimization and Smart Manufacturing*, „Processes” 2023, vol. 11, no. 11, s. 3171.
- Legriel J., Guernic C.L., Cotton S., Maler O., *Approximating the Pareto Front of Multi-criteria Optimization Problems*, „Lecture Notes in Computer Science” 2010, vol. 6015, s. 69–83.
- Lei X., MacKenzie C.A., *Distinguishing between common cause variation and special cause variation in a manufacturing system: A simulation of decision making for different types of variation*, „International Journal of Production Economics” 2020, vol. 220, 107446.
- Lermen F.H., de Fátima Morais M., Matos C., Röder R., Röder C., *Optimization of times and costs of project of horizontal laminator production using PERT/CPM technical*, „Independent Journal of Management & Production” 2016, vol. 7, no. 3, s. 833–853.
- Lerner A., Adler A., Abu-Hanna J., Percia S.C., Matalon M.K., Carmeli Y., *Spread of KPC-producing carbapenem-resistant Enterobacteriaceae: the importance of super-spreaders and rectal KPC concentration*, „Clinical Microbiology and Infection” 2015, vol. 21, no. 5, s. 470–e1.
- Li J.W.D., Chan M.F., *Predictive quality assurance for linear accelerator target failure using statistical process control*, „Biomedical Physics & Engineering Express” 2023, vol. 9, no. 5, 55018.
- Li Q., Liu Z., Hu N., Zhong S., Cheng K., *A New Method for Quality Analysis of Multi-Process Manufacture*, „2022 IEEE 22nd International Conference on Software Quality, Reliability, and Security Companion” 2022, s. 776–777.
- Liker J.K., Morgan J.M., *The Toyota Way in Services: The Case of Lean Product Development*, „Academy of Management Perspectives” 2006, vol. 20, no. 2, s. 5–20.
- Lim S.A.H., Antony J., He Z., Arshed N., *Critical observations on the statistical process control implementation in the UK food industry: A survey*, „International Journal of Quality & Reliability Management” 2017, vol. 34, no. 5, s. 684–700.
- Lin N., Wu Z., Luo S., Zhan M., *The Overview of the Teaching Quality Management Center in the Organization of Higher Education*, w: *Proceedings of the 2019 2nd International Conference on Education, Economics and Social Science (ICEESS 2019)*, 2019, s. 121–124.
- Lisowski J., Szadkowski B., Marzec A., *Effects of Selected Pigments on the Properties of Silicone Resin-Based Paints*, „Materials” 2022, vol. 15, no. 14, 4961.
- Liu Y., Guo W., Pang Y., Zheng B., *A Fast Evaluation Method for Spatial Point Measurement Accuracy in a Large-Scale Measurement System*, „Electronics” 2024, vol. 13, no. 13, 2428.

- Llach J., Fa M., Marimón F., *Relationship between quality-management systems and organizational innovations*, „Human Factors and Ergonomics in Manufacturing & Service Industries” 2010, vol. 21, no. 1, s. 52–66.
- Logunova I.V., Salikov Y.A., Kablashova I.V., Amelin S.V., Enina E.P., *Modernization of Quality Management System in the Conditions of Digital Transformation of Enterprise*, „Russian Conference on Digital Economy and Knowledge Management” 2020, s. 417–422.
- Lopes A.R., Polónia D.F., Gradim A.C., Cunha J., *Challenges in the Integration of Quality and Innovation Management Systems*, „Standards” 2022, vol. 2, no. 1, s. 52–65.
- Lu M., Fan P., *Applying Dematel to Discuss Key Factors in Shaping Organisational Culture of Lean Management*, „South African Journal of Industrial Engineering” 2023, vol. 34, no. 2, s. 22–35.
- Lu Y., Liu C., Kevin I., Wang K., Huang H., Xu X., *Digital Twin-driven smart manufacturing: Connotation, reference model, applications and research issues*, „Robotics and Computer-Integrated Manufacturing” 2020, vol. 61, 101837.
- Luangpaiboon P., *Weighted Centroid Modified Simplex and Linear Constrained Response Surface Optimization Methods for the Xbar-R Chart Variable Determination*, „Journal of Computer Science” 2011, vol. 7, no. 6, s. 836–843.
- Luo W., Pla-Roca M., Juncker D., *Taguchi Design-Based Optimization of Sandwich Immunoassay Microarrays for Detecting Breast Cancer Biomarkers*, „Analytical Chemistry” 2011, vol. 83, no. 14, s. 5767–5774.
- Luoma K., *Leadership Styles for Deming-Based Management Systems*, „American Journal of Management” 2023, vol. 23, no. 4.
- Lusi N., Soepangkat B.O.P., Pramujati B., Agustin H.C.K., *Multiple Performance Optimization in the Wire EDM Process of SKD61 Tool Steel Using Taguchi Grey Relational Analysis and Fuzzy Logic*, „Applied Mechanics and Materials” 2014, vol. 493, s. 523–528.
- Ma S., Nie J., Kang J., Lyu L., Liu R.W., Zhao R., Liu Z., Niyato D., *Privacy-preserving anomaly detection in cloud manufacturing via federated transformer*, „Transactions on Industrial Informatics” 2022, vol. 18, no. 12, s. 8977–8987.
- MacGregor J.F., Kourti T., *Statistical process control of multivariate processes*, „Control Engineering Practice” 1995, s. 403–414.
- Maciaszczyk M., Makiela Z., Miśkiewicz R., *Industry 5.0: A new reality, new challenges*, w: *Innovation in the Digital Economy*, pod red. A. Rzepki, Routledge, London 2023, s. 51–61.
- Mahanti R., Evans J.R., *Critical success factors for implementing statistical process control in the software industry*, „Benchmarking: An International Journal” 2012, vol. 19, no. 3, s. 374–394.
- Makiela Z., Kusio T., *Prerequisites of innovativeness in industry 4.0*, w: *Sustainability, Technology and Innovation 4.0*, pod red. nauk. Z. Makieli, MM. Stuss, R. Borowieckiego, Routledge, London 2021, s. 47–63.
- Maksimović S., Vlašković V., Damnjanović A., *Leadership frameworks amidst crisis-induced events*, „SCIENCE International Journal” 2024, vol. 3, no. 2, s. 65–73.
- Manalansan R.J., *Integrating Strategic Management Elements and Continual Improvement Practices in the ISO 9001 Implementation as Framework for Achieving Organizational Effectiveness*, „Asia Pacific Journal of Academic Research in Business Administration” 2022, vol. 10, no. 2, s. 17–33.

- Manulik S., Rosińczuk J., Karniej P., *Evaluation of health care service quality in Poland with the use of SERVQUAL method at the specialist ambulatory health care center*, „Patient Preference and Adherence” 2016, vol. 10, s. 1435–1442.
- Mao Z., Gonzalez V.A., Zou Y., *Exploring a Digital Twin Framework for lean management of constraints in construction: A literature review*, „IOP Conference Series: Earth and Environmental Science” 2022, vol. 1101, 082019.
- Marín-García J.A., García-Sabater J.J., García-Sabater J.P., Maheut J., *Protocol: Triple Diamond method for problem solving and design thinking. Rubric validation*, „Working Papers on Operations Management” 2020, vol. 11, no. 2, s. 49–68.
- Marshall T., Mohammed M.A., *Case-mix and the use of control charts in monitoring mortality rates after coronary artery bypass*, „BMC Health Services Research” 2007, vol. 7, s. 1–9.
- Mayakova A., *Digital transformation of modern quality management*, „Economic Annals XXI” 2019, vol. 180, no. 11–12, s. 138–145.
- Mayorga A., Gleicher M., *Splatterplots: Overcoming Overdraw in Scatter Plots*, „IEEE transactions on visualization and computer graphics” 2013, vol. 19, no. 9, s. 1526–1538.
- McConachie F., Jenny B., Reinke K., Arrowsmith C., *Barapa Country through Barapa eyes: Cultural mapping of Gunbower Island, Australia*, „Journal of Maps” 2020, vol. 16, no. 1, s. 13–20.
- McLaren J.T., Taher A., Chartier L.B., *Flattening the other curve: reducing emergency department STEMI delays during the COVID-19 pandemic*, „The American Journal of Emergency Medicine” 2021, vol. 49, s. 367–372.
- Melnychenko O., *Is artificial intelligence ready to assess an enterprise’s financial security?*, „Journal of Risk and Financial Management” 2020, vol. 13, no. 9, 191.
- Meng F., Yang J., *Process capability analysis of Taguchi index Cpm based on generalized p-value*, „Quality and Reliability Engineering International” 2023, vol. 39, no. 6, s. 2311–2329.
- Meyers S.M., Balderson M., Létourneau D., *Evaluation of Elekta Agility multi-leaf collimator performance using statistical process control tools*, „Journal of Applied Clinical Medical Physics” 2019, vol. 20, no. 7, s. 100–108.
- Milosavljevic P., Pavlovic D., Rajic M., Pavlovic A., Fragassa C., *Implementation of quality tools in higher education process*, „International Journal of Continuing Engineering Education and Life Long Learning” 2018, vol. 28, no. 1, s. 24–36.
- Mincă E., Filipescu A., Cernega D., Şolea R., Filipescu A., Ionescu D., Simion G., *Digital Twin for a Multifunctional Technology of Flexible Assembly on a Mechatronics Line with Integrated Robotic Systems and Mobile Visual Sensor – Challenges towards Industry 5.0*, „Sensors” 2022, vol. 22, no. 21, 8153.
- Mingoti S.A., Oliveira F.L.P.D., *On Capability Indices for Multivariate Autocorrelated Processes*, „Brazilian Journal of Operations & Production Management” 2011, vol. 8, no. 1, s. 133–152.
- Miskiewicz R., *Internet of things in marketing: Bibliometric analysis*, „Marketing and Management of Innovations” 2020, no. 3, s. 371–381.
- Miśkiewicz R., Wolniak R., *Practical application of the Industry 4.0 concept in a steel company*, „Sustainability” 2020, vol. 12, no. 14, 5776.

- Mizukami Y., Nakano J., *International comparison of cross-disciplinary integration in industry 4.0: A co-authorship analysis using academic literature databases*, „PLOS One” 2022, vol. 17, no. 10, e0275306.
- Mohammed M., Cheng K., Rouse A., Marshall T., *Bristol, Shipman, and clinical governance: Shewhart's forgotten lessons*, „The Lancet” 2001, vol. 357, s. 463–467.
- Molendowski E., Nawracaj-Grygiel K., Ulbrych M., *Determinants of Industry 4.0 Readiness in the Manufacturing of the V4 Economies*, „Comparative Economic Research. Central and Eastern Europe” 2024, vol. 27, no. 4, s. 29–46.
- Mollenkopf D.A., Stolze H.J., Tate W.L., Ueltschy M., *Green, lean, and global supply chains*, „International Journal of Physical Distribution & Logistics Management” 2010, vol. 40, no. 1–2, s. 14–41.
- Montgomery D., Borror C., *Systems for modern quality and business improvement*, „Quality Technology & Quantitative Management” 2017, vol. 14, s. 343–352.
- Montgomery D.C., *A Retrospective on Volume 23 of Quality and Reliability Engineering International*, „Quality and Reliability Engineering International” 2008, vol. 24, no. 1, s. 1–2.
- Mosadeghrad A.M., *Why TQM does not work in iranian healthcare organisations*, „International Journal of Health Care Quality Assurance” 2014, vol. 27, no. 4, s. 320–335.
- Muangmee C., Dacko-Pikiewicz Z., Meekaewkunchorn N., Kassakorn N., Khalid B., *Green entrepreneurial orientation and green innovation in small and medium-sized enterprises (SMEs)*, „Social Sciences” 2021, vol. 10, no. 4, 136.
- Muinga N., Abejirinde I.O.O., Paton C., English M., Zweekhorst M., *Designing paper-based records to improve the quality of nursing documentation in hospitals: A scoping review*, „Journal of Clinical Nursing” 2021, vol. 30, no. 1–2, s. 56–71.
- Muthukrishnan R., *A Study On Impact Of Quality Management System On Organizational Performance At Oil Seal Manufacturing Industries In Madurai*, „Turkish Journal of Computer and Mathematics Education” 2021, vol. 12, no. 10, s. 6011–6018.
- Narahari N.S., Kumar M.V., Guptha C.N., *Recent Developments in Quality Management in the Era of Digital Transformation – A Review*, „European Journal of Theoretical and Applied Sciences” 2023, vol. 1, no. 3, s. 360–375.
- Naveen K., Senanayake R., Selvan C.P., *Continual improvement through ISO 9001 – An evidence based audit conducted in 200 organizations*, „IOP Conference Series: Materials Science and Engineering” 2021, vol. 1104, 012038.
- Neyestani B., Juanzon J.B.P., *Developing an Appropriate Performance Measurement Framework for Total Quality Management (TQM) in Construction and Other Industries*, „International Journal of Technology & Engineering” 2016, vol. 5, no. 2, s. 32–44.
- Norland J.E., Dixon C., Larson D.L., Askerooth K., Geaumont B.A., *Prairie Reconstruction Unpredictability and Complexity: What is the Rate of Reconstruction Failures?*, „Ecological Restoration” 2018, vol. 36, no. 4, s. 263–266.
- Okuyelu O., Adaji O., *AI-Driven Real-time Quality Monitoring and Process Optimization for Enhanced Manufacturing Performance*, „Journal of Advances in Mathematics and Computer Science” 2024, vol. 39, no. 4, s. 81–89.

- Onofrei G., Fynes B., Nguyen H., Azadnia A., *Quality and lean practices synergies: A swift even flow perspective*, „International Journal of Quality & Reliability Management” 2020, vol. 38, no. 1, s. 98–115.
- Opaleye A., Okunade O.S., Adedeji T., Oladokun V., *Quality characterisation and capability assessment of a tobacco company*, „American Journal of Theoretical and Applied Statistics” 2020, vol. 9, no. 4, s. 127–135.
- Ortt R., Stolwijk C., Punter M., *Implementing Industry 4.0: assessing the current state*, „Journal of Manufacturing Technology Management” 2020, vol. 31, no. 5, s. 825–836.
- Ozoemena C.E., Hackney P., Birkett M., Bell D., *An experimental strategy for fractionating 33 and 34 factorial experiments*, „International Journal for Quality Research” 2019, vol. 13, no. 3, s. 505–520.
- Pajzderski P., Iglantowicz T., *Dokładność metody pomiarowej a niepewność pomiaru – próba analizy*, „Pomiary Automatyka Kontrola” 2000, vol. 46, s. 14–16.
- Pal B., Pal A., Das S., Palit S., Sarkar P., Mondal S., Mallik S., Goswami J., Das S., Sen A., Mondol M., *Retrospective study on performance of constancy check device in Linac beam monitoring using Statistical Process Control*, „Reports of Practical Oncology and Radiotherapy” 2020, vol. 25, no. 1, s. 91–99.
- Panahy P.H.S., Sidi F., Affendey L.S., Jabar M.A., *The impact of data quality dimensions on business process improvement*, w: *4th World Congress on Information and Communication Technologies (WICT 2014)*, 2014, s. 70–73.
- Pareto V., *The New Theories of Economics*, „Journal of Political Economy” 1897, vol. 5, no. 4, s. 485–502.
- Park S.H., Dhalgaard-Park S.M., Kim D.C., *New Paradigm of Lean Six Sigma in the 4th Industrial Revolution Era*, „Quality Innovation Prosperity” 2020, vol. 24, no. 1, s. 1–16.
- Parteo V., *The New Theories of Economics*, „Journal of Political Economy” 1897, vol. 5, no. 4, s. 485–502.
- Pascu C., Didu A., Gheorghe Ș., *Study about the Application of Statistical Process Control for Process Quality Improvement in Automotive Industry*, „Applied Mechanics and Materials” 2020, vol. 896, s. 169–174.
- Patel P.C., Terjesen S., Li D., *Enhancing effects of manufacturing flexibility through operational absorptive capacity and operational ambidexterity*, „Journal of Operations Management” 2012, vol. 30, no. 3, s. 201–220.
- Pathmaraj K., *The importance of quality management systems in nuclear medicine departments*, „Journal of Medical Radiation Sciences” 2024, vol. 71, no. 2, s. 167–169.
- Pawlicki T., Whitaker M.L., Boyer A.L., *Statistical process control for radiotherapy quality assurance*, „Medical Physics” 2005, vol. 32, no. 9, s. 2777–2786.
- Perlijar A., *Maintenance Analysis of Ripple Mill Machine Using PERT Method at PT Ujong Neubok Dalam*, „Jurnal Inotera” 2023, vol. 8, no. 1, s. 198–202.
- Perno M., Hvam L., *Developing a Framework for Scoping Digital Twins in the Process Manufacturing Industry*, w: *SPS2020, Proceedings of the Swedish Production Symposium, October 7-8, 2020*, 2020, vol. 13, s. 475–486.
- Pheng T., Chuluunsai Khan T., Ryu G., Kim S., Nasridinov A., Yoo K., *Prediction of Process Quality Performance Using Statistical Analysis and Long Short-Term Memory*, „Applied Sciences” 2022, vol. 12, no. 2, 735.

- Piercy N., Rich N., *The relationship between lean operations and sustainable operations*, „International Journal of Operations & Production Management” 2015, vol. 35, no. 2, s. 282–315.
- Pietraszek J., Radek N., Goroshko A.V., *Challenges for the DOE methodology related to the introduction of Industry 4.0*, „Production Engineering Archives” 2020, vol. 26, no. 4, s. 190–194.
- Pimentel L., Major M., *Key success factors for quality management implementation: evidence from the public sector*, „Total Quality Management & Business Excellence” 2015, vol. 27, no. 9–10, s. 997–1012.
- PN-ISO 8258+AC1:1996 Karty kontrolne Shewharta.
- Polcyn J., Us Y., Lyulyov O., Pimonenko T., Kwilinski A., *Factors influencing the renewable energy consumption in selected European countries*, „Energies” 2021, vol. 15, no. 1, 108.
- Poll J.V.D., Chen L., *Strategic Priorities for Employees Deviate from the Widely-employed Pareto’s Law*, „International Journal of Economics, Business and Management Research” 2022, vol. 6, no. 5, s. 10–18.
- Polpinij J., Ghose A.K., Dam H.K., *Business Rules Discovery from Process Design Repositories*, w: *6th World Congress on Services*, 2010, s. 614–620.
- Poszytek P., *The landscape of scientific discussions on the competencies 4.0 concept in the context of the 4th industrial revolution – a bibliometric review*, „Sustainability” 2021, vol. 13, no. 12, 6709.
- Pratiwi N., Susilowati E., Syukriah S., Pianda D., Susanti E., *Quality Performance of Manufacturing Companies in West Java: SCM, TQM, and JIT Impact*, „Jurnal Informatika Ekonomi Bisnis” 2023, s. 785–790.
- Premarathna N., Godfrey A.J.R., Govindaraju K., *Decomposition of stock market trade-offs using Shewhart methodology*, „International Journal of Quality & Reliability Management” 2016, vol. 33, no. 9, s. 1311–1331.
- Przekota G., Szczepanska-Przekota A., *Application of multi-level analysis in modeling economy productivity*, „Procedia Computer Science” 2023, vol. 225, s. 4860–4869.
- Pussella H., Yapa S.T.W.S., *Barriers in Implementing Total Quality Management in Organizations: A Literature Review*, w: *Proceedings of the 17th International Conference on Business Management*, 2020, vol. 17.
- Puttikunsakon A., Boonlua S., Raksong S., *Success Factors on Strategic Quality Management Costing: An Empirical Investigation of ISO 9000 Manufacturing Firms in Thailand*, „Suranaree Journal of Social Science” 2017, vol. 11, no. 2, s. 97–117.
- Pysin M., Lobanov A., *Digital Twin is a complex of microservices*, „E3S Web of Conferences” 2023, vol. 458, 09012.
- Qiu P., *Statistical Process Control Charts as a Tool for Analyzing Big Data*, w: *Big and Complex Data Analysis: Methodologies and Applications*, pod red. nauk. S.E. Ahmeda, Springer, 2017, s. 123–138.
- Qutait M.A., *The Role of Six Sigma Approach by Applying (DMAIC) Model and Forming Work Team in Improving Banks Performance: A Survey Study in Syrian Banks in Damascus*, „Journal of Social Sciences” 2018, vol. 14, no. 1, s. 169–180.
- Radson D., Boyd A.H., *The Pareto Principle and Rate Analysis*, „Quality Engineering” 1997, vol. 10, s. 223–229.

- Rao R.S., Kumar C.G., Prakasham R.S., Hobbs P.J., *The Taguchi methodology as a statistical tool for biotechnological applications: A critical appraisal*, „Biotechnology Journal: Healthcare Nutrition Technology” 2008, vol. 3, no. 4, s. 510–523.
- Redmond R., Curtis E., Noone T., Keenan P., *Quality in higher education: The contribution of Edward Deming's principles*, „International Journal of Educational Management” 2008, vol. 22, no. 5, s. 432–441.
- Rehman A., Umar T., *Literature review: Industry 5.0. Leveraging technologies for environmental, social and governance advancement in corporate settings*, „Corporate Governance: The International Journal of Business in Society” 2024, vol. 25, no. 2, s. 229–251.
- Ręklewski M., *Statystyka opisowa*, Wydawnictwo Państwowej Uczelni Zawodowej we Włocławku, Włocławek 2020, s. 1–182.
- Riley S., Burhouse A., Nicholas T., *National Health Service (NHS) trust boards adopt statistical process control reporting: the impact of the Making Data Count Training Programme*, „BMJ Leader” 2021, vol. 5, no. 4, s. 252–257.
- Rivoire P., Martius O., Naveau P., *A Comparison of Moderate and Extreme ERA-5 Daily Precipitation With Two Observational Data Sets*, „Earth and Space Science” 2021, vol. 8, no. 4, e2020EA001633.
- Rogers J., Révész A., *Experimental and quasi-experimental designs*, w: *The Routledge Handbook of Research Methods in Applied Linguistics*, pod red. nauk. J. McKinleya, Rose H., Routledge, London 2019, s. 133–143.
- Rönnbäck Å., Witell L., *The impact of quality management principles on business performance – A comparison between manufacturing and service organisations*, „Managing Service Quality” 2008, vol. 18, no. 6, s. 577–598.
- Roriz C.N.E., Sousa S., *Application of Lean Production Principles and Tools for Quality Improvement of Production Processes in a Carton Company*, „Procedia Manufacturing” 2017, vol. 11, s. 1069–1076.
- Rowlands H., Antony J., Knowles G., *An application of experimental design for process optimisation*, „The TQM magazine” 2000, vol. 12, no. 2, s. 78–84.
- Ruamchat K., Thawesaengskulthai N., Pongpanich C., *Development of quality management system under ISO 9001: 2015 and Joint Inspection Group (JIG) for aviation fuelling service*, „Management and Production Engineering Review” 2017, vol. 8, no. 3, s. 50–59.
- Sadeghi D., Karbasi S., Razavi S., Mohammadi S., Shokrgozar M.A., Bonakdar S., *Electrospun poly (hydroxybutyrate)/chitosan blend fibrous scaffolds for cartilage tissue engineering*, „Journal of Applied Polymer Science” 2016, vol. 133, no. 47.
- Saleh N.A., Mahmoud M.A., Abdel-Salam A.G., *The Performance of the Adaptive Exponentially Weighted Moving Average Control Chart with Estimated Parameters*, „Quality and Reliability Engineering International” 2013, vol. 29, no. 4, s. 595–606.
- Sampul D., Binilang B.B., Senduk J., Oentoe F.J., *Implementation of the Internal Quality Assurance Process: Quality Mapping Analysis at State Senior High School in Tomohon City, North Sulawesi, Indonesia*, „International Journal of Recent Educational Research” 2020, vol. 1, no. 2, s. 124–133.

- Sánchez M., Alvarez C.R., Brandolin A., *A multivariate statistical process control procedure for BIAS identification in steady-state processes*, „AICHe journal” 2008, vol. 54, no. 8, s. 2082–2088.
- Sandadi S., Ensari S., Kearns B., *Application of Fractional Factorial Designs to Screen Active Factors for Antibody Production by Chinese Hamster Ovary Cells*, „Biotechnology Progress” 2006, vol. 22, no. 2, s. 595–600.
- Sanders R., *The Pareto Principle: its use and abuse*, „Journal of Services Marketing” 1987, vol. 1, s. 37–40.
- Sanghangthum T., Suriyapee S., Kim G., Pawlicki T., *A method of setting limits for the purpose of quality assurance*, „Physics in Medicine and Biology” 2013, vol. 58, no. 19, s. 7025–7037.
- Santos G., Sá J.C., Félix M.J., Barreto L., Carvalho F., Doiro M., Zgodavová K., Stefanović M., *New Needed Quality Management Skills for Quality Managers 4.0*, „Sustainability” 2021, vol. 13, no. 11, 6149.
- Santoso I., Prameswari P.A.I., Yushila A.B., Arwani M., *Fuzzy sequential model for strategic planning of small and medium scale industries*, „TELKOMNIKA” 2019, vol. 17, no. 3, s. 1310–1316.
- Saragih J., Tarigan A., Pratama I., Wardati J., Silalahi E.F., *The impact of Total Quality Management, supply chain management practices and operations capability on firm performance*, „Polish Journal of Management Studies” 2020, vol. 21, no. 2, s. 384–397.
- Sarkar B., *Total quality management – problems and prospects in India*, „Total Quality Management & Business Excellence” 1991, vol. 2, s. 239–248.
- Schmidtke K.A., Poots A.J., Carpio J., Vlaev I., Kandala N.B., Lilford R.J., *Considering chance in quality and safety performance measures: an analysis of performance reports by boards in English NHS trusts*, „BMJ Quality & Safety” 2017, vol. 26, no. 1, s. 61–69.
- Scholtes P.R., *The Leader’s Handbook: Making Things Happen, Getting Things Done*, McGraw-Hill, 1998, s. 1–415.
- Shabrawy A., *The Application of Pareto Distribution Principle to Quality Control in repair workshops*, w: *International Conference on Applied Mechanics and Mechanical Engineering*, May 1986, vol. 1, s. 31–39.
- Shahada T.M., Alsyouf I., *Design and implementation of a Lean Six Sigma framework for process improvement: A case study*, w: *International Conference on Industrial Engineering and Engineering Management*, 2012, s. 80–84.
- Shamsi M.A., Alam A., *Exploring Lean Six Sigma implementation barriers in Information Technology industry*, „International Journal of Lean Six Sigma” 2018, vol. 9, no. 4, s. 523–542.
- Shao Y.E., *Recognition of Process Disturbances for an SPC/EPC Stochastic System Using Support Vector Machine and Artificial Neural Network Approaches*, „Abstract and Applied Analysis” 2014, 519705.
- Sharma G.V.S.S., Rao P.S., *A DMAIC approach for process capability improvement an engine crankshaft manufacturing process*, „Journal of Industrial Engineering International” 2014, vol. 10, s. 1–11.
- Sharma M.J., Sharma S., Sahni S.P., *Structured problem solving: combined approach using 8D and Six Sigma case study*, „Engineering Management in Production and Services” 2020, vol. 12, no. 1, s. 57–69.

- Shephard R., Färe R., *The Law of Diminishing Returns*, „Zeitschrift für Nationalökonomie” 1974, vol. 34, s. 60–69.
- Shokri A., *Application of Sono-photo-Fenton process for degradation of phenol derivatives in petrochemical wastewater using full factorial design of experiment*, „International Journal of Industrial Chemistry” 2018, vol. 9, s. 295–303.
- Singh A., Lou H.H., *Hierarchical Pareto Optimization for the Sustainable Development of Industrial Ecosystems*, „Industrial & Engineering Chemistry Research” 2006, vol. 45, no. 9, s. 3265–3279.
- Singh G., Singh D., *CSFs for Six Sigma implementation: a systematic literature review*, „Journal of Asia Business Studies” 2020, vol. 14, no. 5, s. 795–818.
- Singh G., Verma A., *A Brief Review on injection moulding manufacturing process*, „Materials Today” 2017, vol. 4, s. 1423–1433.
- Singh K., Ahuja I.S., *Effectiveness of tpm implementation with and without integration with tqm in indian manufacturing industries*, „Journal of Quality in Maintenance Engineering” 2014, vol. 20, no. 4, s. 415–435.
- Singh S., Dixit S., Sahai S., Sao A., Kalonia Y., Kumar R.S., *Key Benefits of Adopting Lean Manufacturing Principles in Indian Construction Industry*, „MATEC Web of Conferences” 2018, vol. 172, 05002.
- Singh S., Meeks L.M., *Disability inclusion in medical education: Towards a quality improvement approach*, „Medical Education” 2022, vol. 57, no. 1, s. 102–107.
- Singson M., Hangsing P., *Implication of 80/20 Rule in Electronic Journal Usage of UGC-Infonet Consortia*, „The Journal of Academic Librarianship” 2015, vol. 41, no. 2, s. 207–219.
- Sisay D., Verhees F., Trijp J., *Marketing activities as critical success factors: The case of seed producer cooperatives in Ethiopia*, „African Journal of Business Management” 2017, vol. 11, no. 19, s. 548–563.
- Smith H.D., Megahed F.M., Jones-Farmer L.A., Clark M., *Using Visual Data Mining to Enhance the Simple Tools in Statistical Process Control: A Case Study*, „Quality and Reliability Engineering International” 2014, vol. 30, no. 6, s. 905–917.
- Song P., Qie Y., Hao C., Li Y., Zhao Y., Hao Y., Liu H., Qi Y., *Resource-Saving Customizable Pipeline Network Architecture for Multi-Signal Processing in Edge Devices*, „Sensors” 2022, vol. 22, no. 15, 5720.
- Stępień S., Smędzik-Ambroży K., Polcyn J., Kwiliński A., Maican I., *Are small farms sustainable and technologically smart? Evidence from Poland, Romania, and Lithuania*, „Central European Economic Journal” 2023, vol. 10, no. 57, s. 116–132.
- Stolle D.P., Robbennolt J.K., Patry M., Penrod S.D., *Fractional factorial designs for legal psychology*, „Behavioral Sciences & the Law” 2002, vol. 20, no. 1–2, s. 5–17.
- Strotmann C., Göbel C., Friedrich S., Kreyenschmidt J., Ritter G., Teitscheid P., *A Participatory Approach to Minimizing Food Waste in the Food Industry – A Manual for Managers*, „Sustainability” 2017, vol. 9, no. 1, 66.
- Sujová A., Simanová I., Marcinek K., *Sustainable Process Performance by Application of Six Sigma Concepts: The Research Study of Two Industrial Cases*, „Sustainability” 2016, vol. 8, no. 3, 260.
- Sułkowski Ł., *Kultura jakości w zarządzaniu, czyli pomiędzy tożsamością a kulturą organizacyjną*, „Przedsiębiorczość i Zarządzanie” 2013, t. 14, z. 8, s. 25–37.

- Sumaedi S., Yarmen M., *The Effectiveness of ISO 9001 Implementation in Food Manufacturing Companies: A Proposed Measurement Instrument*, „Procedia Food Science” 2015, vol. 3, s. 436–444.
- Sun M., Bao T., Xie D., Lv H., Si G., *Edge Collaborative Online Task Offloading Method Based on Reinforcement Learning*, „Electronics” 2023, vol. 12, no. 18, 3741.
- Sun W., Ma J., Liang M., *Research on Quality Control of Medical Device Production Process*, „International Journal of Materials, Mechanics and Manufacturing” 2019, vol. 7, no. 3, s. 133–137.
- Sundström N., Lennartson B., *Event-and time-based design of operation sequences with uncertainties in execution times*, w: *18th Conference on Emerging Technologies & Factory Automation (ETFA)*, 2013, s. 1–8.
- Supriadi A., *The Influence of Quality of Raw Materials and Quality of Production Processes on Product Quality of MSMEs: A Moderation Analysis of Supplier Partnerships*, „International Journal of Islamic Business and Management Review” 2022, vol. 2, no. 2, s. 237–248.
- Susilowati T.B., Handoko V.R., Kusbandrijo B., *Evaluation of quality assurance of primary school education in ponorogo regency*, „Jurnal Administrasi Publik” 2023, vol. 21, no. 1, s. 230–246.
- Susomrith P., Coetzer A., *Effects of informal learning on work engagement*, „Personnel Review” 2019, vol. 48, no. 7, s. 1886–1902.
- Sutrisno T.F., *Relationship between total quality management element, operational performance and organizational performance in food production SMEs*, „Jurnal Aplikasi Manajemen” 2019, vol. 17, no. 2, s. 285–294.
- Szczepańska-Woszczyna K., Kurowska-Pysz J., *Sustainable business development through leadership in SMEs*, „Engineering Management in Production and Services” 2016, vol. 8, no. 3, s. 57–69.
- Szerszunowicz M., *Analiza zdolności procesu o zależnych charakterystykach*, „Studia Ekonomiczne” 2013, vol. 152, s. 153–161.
- Taguchi Y., Turki T., *Projection in genomic analysis: A theoretical basis to rationalize tensor decomposition and principal component analysis as feature selection tools*, „PLOS One” 2022, vol. 17, no. 9, e0275472.
- Talib F., Rahman Z., Qureshi M.N., *An empirical investigation of relationship between total quality management practices and quality performance in Indian service companies*, „International Journal of Quality & Reliability Management” 2013, vol. 30, no. 3, s. 280–318.
- Tanco M., Viles E., Pozueta L., *Are All Designs of Experiments Approaches Suitable for Your Company?*, w: *Proceedings of the World Congress on Engineering*, 2008, vol. 2.
- Teplická K., Khouri S., Mudarri T., Freňáková M., *Improving the Quality of Automotive Components through the Effective Management of Complaints in Industry 4.0*, „Applied Sciences” 2023, vol. 13, no. 14, 8402.
- Thomas A.J., Antony J., *A comparative analysis of the Taguchi and Shainin DOE techniques in an aerospace environment*, „International Journal of Productivity and Performance Management” 2005, vol. 54, no. 8, s. 658–678.
- Thor J., Lundberg J., Ask J., Olsson J., Carli C., Härenstam K.P., Brommels M., *Application of statistical process control in healthcare improvement: systematic review*, „BMJ Quality & Safety” 2007, vol. 16, no. 5, s. 387–399.

- Timmis K.N., Verstraete W., Regina V.R., Hallsworth J.E., *The Pareto principle: To what extent does it apply to resource acquisition in stable microbial communities and thereby steer their geno-/ecotype compositions and interactions between their members?*, „Environmental Microbiology” 2023, vol. 25, no. 7, s. 1221–1231.
- Torres J.T., Benítez-Amado J., Pérez-Arostegui M.N., Barrales-Molina V., *Exploitation versus exploration: the influence of manufacturing flexibility and the environment*, „International Journal of Business Environment” 2011, vol. 4, no. 1, s. 92–105.
- Torugsa N.A., O’Donohue W., Hecker R., *Proactive CSR: An Empirical Analysis of the Role of its Economic, Social and Environmental Dimensions on the Association between Capabilities and Performance*, „Journal of Business Ethics” 2012, vol. 115, no. 2, s. 383–402.
- Trentin L., Tontini G., *The influence of people management practices on a culture of lean manufacturing*, „Revista De Administração Da UFSM” 2022, vol. 15, no. 3, s. 512–540.
- Trubetskaya A., McDermott O., Ryan A., *Application of Design for Lean Six Sigma to strategic space management*, „The TQM Journal” 2023, vol. 35, no. 9, s. 42–58.
- Tse G., Algaze C., Pageler N., Wood M., Chadwick W., *Using Clinical Decision Support Systems to Decrease Intravenous Acetaminophen Use: Implementation and Lessons Learned*, „Applied Clinical Informatics” 2024, vol. 15, no. 1, s. 64–74.
- Tse Y.K., Zhang M., Tan K.H., Pawar K.S., Fernandes K., *Managing quality risk in supply chain to drive firm's performance: The roles of control mechanisms*, „Journal of Business Research” 2019, vol. 97, s. 291–303.
- Tukiran M., Sari N.P., Tjitrabudi L.D., Amalia N., *Implementation of Business Process Mapping Framework for Indonesia’s Government Institutions*, „Jurnal Studi Pemerintahan” 2023, vol. 13, no. 2, s. 281–306.
- Uhm T., Yi S., *A comparison of normality testing methods by empirical power and distribution of P-values*, „Communications in Statistics-Simulation and Computation” 2023, vol. 52, no. 9, s. 4445–4458.
- Uluskan M., Oda E.P., *A thorough Six Sigma DMAIC application for household appliance manufacturing systems: Oven door-panel alignment case*, „The TQM Journal” 2020, vol. 32, no. 6, s. 1683–1714.
- Valmohammadi C., Kalantari M., *The moderating effect of motivations on the relationship between obtaining ISO 9001 certification and organizational performance*, „The TQM Journal” 2015, vol. 27, no. 5, s. 503–518.
- Varela M.L.R., Santos A.S., Madureira A.M., Putnik G.D., Cruz-Cunha M.M., *Collaborative Framework for Dynamic Scheduling Supporting in Networked Manufacturing Environments*, „International Journal of Web Portals” 2014, vol. 6, no. 3, s. 33–51.
- Vetter T.R., Morrice D., *Statistical Process Control: No Hits, No Runs, No Errors?*, „Anesthesia & Analgesia” 2019, vol. 128, no. 2, s. 374–382.
- Wang H., Zrada M., Anderson K., Katwaru R., Harradine P., Choi B., Tong V., Pajkovic N., Mazenko R., Cox K., Cohen L.H., *Understanding and Reducing the Experimental Variability of In Vitro Plasma Protein Binding Measurements*, „Journal of Pharmaceutical Sciences” 2014, vol. 103, no. 10, s. 3302–3309.
- Wang P., Zhang D.H., Li S., Wang M.W., Chen B., *Statistical Process Control Based on Kalman Filter in Manufacturing Process*, „Advanced Materials Research” 2011, vol. 201, s. 986–989.

- Wang X., Zhu L., Yang S., *The relationship between the use benefit of educational funds and education quality*, „Frontiers in Educational Research” 2023, vol. 6, no. 31, s. 1–5.
- Wang X.Z., Zhou H., Zhai Z.S., *Research on Improving the Measurement Accuracy of Laser Interferometer System*, „Key Engineering Materials” 2013, vol. 562, s. 1021–1026.
- Wheeler D.J., Chambers D.S., *Understanding statistical process control*, SPC Press, 2010, s. 1–428.
- Wong B.M., Headrick L.A., *Application of continuous quality improvement to medical education*, „Medical Education” 2020, vol. 55, no. 1, s. 72–81.
- Woodroof P.J., Howie K., Peasley M.C., *Nonprofit quality: What is it and why should nonprofits care?*, „Journal of Philanthropy and Marketing” 2020, vol. 26, no. 1.
- Woolhouse M., Shaw D., Matthews L., Liu W.M.D.J., Thomas M., *Epidemiological implications of the contact network structure for cattle farms and the 20–80 rule*, „Biology Letters” 2005, vol. 1, no. 3, s. 350–352.
- Xin-jia X., Feng Y., *Process quality indices: new metrics for process quality capability with zero-loss baseline*, „Total Quality Management & Business Excellence” 2021, vol. 33, no. 9–10, s. 975–993.
- Xueliang H., *A study of Lean Production and Quality Management on Production Performance: The Evidence in High-tech Manufacturing Companies in China*, „International Journal of Science and Business” 2023, vol. 22, no. 1, s. 53–70.
- Yadav A., *Measurement Systems Analysis and a Study of ANOVA Method*, „International Journal of Research in Engineering and Technology” 2016, vol. 5, no. 2, s. 123–127.
- Yang C., Chang C., Niu H., Wu H., *Increasing detectability in semiconductor foundry by multivariate statistical process control*, „Total Quality management” 2008, vol. 19, no. 5, s. 429–440.
- Yang C.C., *The impact of human resource management practices on the implementation of total quality management: An empirical study on high-tech firms*, „The TQM Magazine” 2006, vol. 18, no. 2, s. 162–173.
- Yang Q., Liu J., Yang K., *Modelling of cross organizational manufacturing resource service chain based on service supply-demand dynamic matching network*, „MATEC Web of Conferences” 2019, vol. 277, 01005.
- Yao Y.C., *Research on effectiveness evaluation method and application of quality management system of manufacturing enterprise based on interval-valued hesitation fuzzy set*, „Vibroengineering Procedia” 2017, vol. 14, s. 294–299.
- Yeşiloğlu S.N., Turan-Oluk N., Tufan Y., *Development and Use of Flowcharts for Identifying Types of Isomers and Naming Coordination Compounds*, „Journal of Chemical Education” 2021, vol. 98, no. 6, s. 1988–1996.
- Yi Y., Shieh J.C., *Is there the Pareto principle in public library circulation? A case study of one public library in Taiwan*, „Information Science” 2019, vol. 24, no. 2, s. 97–113.
- Yin H., Zhang G., Zhu H., Deng Y., He F., *An integrated model of statistical process control and maintenance based on the delayed monitoring*, „Reliability Engineering & System Safety” 2015, vol. 133, s. 323–333.

- Young T., Khaliukova O., André N., Petutschnigg A., Rials T., Chen C., *Detecting special-cause variation 'events' from process data signatures*, „Journal of Applied Statistics” 2019, vol. 46, s. 3032–3043.
- Younnes D., *The Impact of Lean Manufacturing Practices on Green Sustainability: The Case of Abdulghani Company*, „European Journal of Business and Management Research” 2023, vol. 8, no. 3, s. 62–67.
- Yousef N., Yousef F., *Using total quality management approach to improve patient safety by preventing medication error incidences*, „BMC Health Services Research” 2017, vol. 17, no. 1, s. 1–16.
- Yurchenko I., Bandurin M., Bandurina I., *Modernization of reclamation agriculture management systems*, „BIO Web of Conferences” 2021, vol. 37, 00026.
- Zaludova A.H., Režný Z., Ullrich M., *A survey of some recent Czechoslovak work in automatic statistical process control*, „Journal of Applied Probability” 1968, vol. 5, no. 1, s. 43–54.
- Zhang X., Woodall W., *Dynamic Probability Control Limits for Lower and Two-Sided Risk-Adjusted Bernoulli CUSUM Charts*, „Quality and Reliability Engineering International” 2017, vol. 33, no. 3, s. 607–616.
- Zhou G., Ma J., Tang Y., Wang X., Zhang J., Yao X., Jiang W., Duan J.A., *Optimization of Ultrasound-Assisted Extraction Followed by Macroporous Resin Purification for Maximal Recovery of Functional Components and Removal of Toxic Components from Ginkgo biloba Leaves*, „BioMed Research International” 2018, vol. 2018, no. 1, 4598067.
- Zhu X., Ji Y., *A digital twin-driven method for online quality control in process industry*, „The International Journal of Advanced Manufacturing Technology” 2022, s. 3045–3064.
- Zieja M., Smoliński H., Gołda P., *Proactive methods – new quality in aircraft flight safety management*, „Journal of KONBiN” 2015, vol. 36, s. 105–114.
- Zimon D., *Analysis of the impact of standardized quality management system for the improvement of cooperation in the supply chain on the basis of small and medium-sized organizations*, „Journal of Positive Management” 2017, vol. 7, no. 2, s. 36–45.
- Zonnenshain A., Kenett R.S., *Quality 4.0 – the challenging future of quality engineering*, „Quality Engineering” 2020, vol. 32, no. 4, s. 614–626.
- Zu X., Fredendall L.D., Douglas T.J., *The evolving theory of quality management: The role of Six Sigma*, „Journal of Operations Management” 2008, vol. 26, no. 5, s. 630–650.
- Zuev M.B., Zuev B.P., Bulgakova I.N., *The formation and development of the performance assessment method in the conception of operational management*, „Бизнес-информатика” 2020, vol. 14, no. 1, s. 75–84.
- Zupic I., Čater T., *Bibliometric Methods in Management and Organization*, „Organizational Research Methods” 2014, s. 429–472.

WYKAZ TABEL

Tabela 1.1. Zasady zarządzania jakością Deminga.....	35
Tabela 1.2. Typologia marnotrawstw charakterystycznych dla Lean Manufacturing	43
Tabela 1.3. Top 10 wiodących autorów na tematy obejmujące aspekty zasady Pareto i zarządzania jakością.....	68
Tabela 2.1. Wartości stałych dla kart kontrolnych	86
Tabela 2.2. Zależność między wskaźnikiem zdolności procesu Cpk, liczbą odchyłeń standardowych a liczbą wadliwych części na milion.....	108
Tabela 2.3. Wartości minimalnej liczby jednostek pomiarowych w odniesieniu do wielkości podgrupy	129
Tabela 2.4. Wartości minimalnej liczby punktów poza granicami kontrolnymi w odniesieniu do wielkości podgrupy.....	129
Tabela 2.5. Matryca eksperymentu pełnoczynnikowego dla trzech czynników (A, B, C) testowanych na dwóch poziomach: –1 oraz 1	145
Tabela 2.6. Analiza porównawcza pomiędzy eksperymentem pełnoczynnikowym oraz frakcjonowanym w ujęciu wybranych cech.....	149
Tabela 2.7. Matryca eksperymentu pełnoczynnikowego.....	150
Tabela 2.8. Matryca eksperymentu frakcjonowanego	151
Tabela 2.9. Poziomy rozdzielczości oraz struktura aliasów w eksperymentach frakcjonowanych, w których liczba przebiegów odpowiada połowie pełnego eksperymentu	153
Tabela 2.10. Zależność między liczbą przebiegów, aliasingiem, rezolucją a kosztami w eksperymentach frakcjonowanych.....	154
Tabela 4.1. Tabela źródeł zmienności	211
Tabela 4.2. Czynniki budujące zmienność – operator do operatora	220
Tabela 4.3. Tabela czynników i poziomów – DoE	222
Tabela 4.4. Matryca eksperymentu frakcjonowanego – studium przypadku.....	223
Tabela 4.5. Matryca odpowiedzi – interakcja AB.....	228

WYKAZ RYSUNKÓW

Rysunek W.1. Ideogram badań.....	23
Rysunek 1.1. Wytyczne PRISMA w ujęciu badania wpływu zasady Pareto na zarządzanie jakością	64
Rysunek 1.2. Rozkład dokumentów w ujęciu czasowym (1990–2024).....	66
Rysunek 1.3. Rozkład dokumentów z podziałem na sponsorów – top 10 organizacji/programów.....	66
Rysunek 1.4. Liczba publikacji w odniesieniu do kraju pochodzenia z uwzględnieniem cytowań.....	67
Rysunek 1.5. Analiza wzajemnej zależności w obrębie wyróżnionych słów kluczy	69
Rysunek 1.6. Analiza wzajemnej zależności w obrębie stosowanych słów kluczowych – aspekt ewolucyjny	70
Rysunek 2.1. Konstrukcja karty kontrolnej wartości średnich $\bar{X}$ bar.....	84
Rysunek 2.2. Konstrukcja karty kontrolnej rozstępu R.....	85
Rysunek 2.3. Konstrukcja karty kontrolnej rozstępu I.....	88
Rysunek 2.4. Konstrukcja karty kontrolnej ruchomego rozstępu MR	89
Rysunek 2.5. Charakterystyka kart kontrolnych $\bar{X}$ bar-R i IMR.....	90
Rysunek 2.6. Budowa histogramu.....	93
Rysunek 2.7. Przykłady rozkładu danych – histogram	94
Rysunek 2.8. Typy rozkładów w zależności od wartości współczynnika skośności	95
Rysunek 2.9. Typologia rozkładów w ujęciu wartości kurtozy.....	95
Rysunek 2.10. Przykładowa konstrukcja diagramu Pareto	97
Rysunek 2.11. Przykładowa struktura wykresu rozrzutu	100
Rysunek 2.12. Struktura diagramu Ishikawy	104
Rysunek 2.13. Schemat obrazujący różnice pomiędzy wskaźnikiem C_p i C_{pk} w ujęciu różnych scenariuszy.....	107
Rysunek 2.14. Przykładowa karta kontrolna ruchomego rozstępu MR – wyznaczenie wartości ruchomego rozstępu	110
Rysunek 2.15. Przykładowa karta kontrolna rozstępu R – wyznaczenie wartości rozstępu.....	110
Rysunek 2.16. Dystrybucja danych procesowych wraz z obliczonymi wartościami wskaźników C_p , C_{pk} , P_p i P_{pk}	113
Rysunek 2.17. Zmienność specjalna na karcie kontrolnej ruchomego rozstępu MR....	114

Rysunek 2.18. Karta kontrolna wartości indywidualnych – rzeczywista zmienność procesu	114
Rysunek 2.19. Rozkład danych – zmienność naturalna.....	117
Rysunek 2.20. Rozkład danych – zmienność specjalna.....	117
Rysunek 2.21. Karta wartości indywidualnych I oraz ruchomego rozstępu MR – zmienność naturalna.....	118
Rysunek 2.22. Karta wartości indywidualnych I oraz ruchomego rozstępu MR – zmienność specjalna.....	119
Rysunek 2.23. Porównanie rozrzutu wyników przy braku powtarzalności oraz przy wysokiej powtarzalności	123
Rysunek 2.24. Analiza dokładności pomiarów. Przykład znaczącego odchylenia od wartości wzorcowej (brak dokładności) oraz pomiarów o wysokiej dokładności (bliskość do wartości wzorcowej)	124
Rysunek 2.25. Rozróżnienie pomiędzy dokładnością a precyzją w aspekcie analizy systemu pomiarowego.....	125
Rysunek 2.26. Przesunięcie pomiędzy operatorami – brak zastępowalności	126
Rysunek 2.27. Przykładowe drzewo próbkowania – analiza systemu pomiarowego (MSA)	127
Rysunek 2.28. Karta kontrolna Xbar-R na podstawie schematu drzewa próbkowania	128
Rysunek 2.29. Karta kontrolna Xbar z uwzględnieniem podziału na poszczególnych pracowników – powtarzalność i odtwarzalność.....	130
Rysunek 2.30. Poszczególne elementy mapowania procesu	134
Rysunek 2.31. Struktura prostych diagramów przepływu – mapowanie procesu	135
Rysunek 2.32. Struktura diagramu zależności – mapowanie procesu	135
Rysunek 2.33. Struktura wykresu PERT – mapowanie procesu.....	136
Rysunek 4.1. Uproszczony schemat procesu produkcji farby jednoskładnikowej	190
Rysunek 4.2. Schemat integralnego modelu statystycznej kontroli procesu i projektowania eksperymentu z wykorzystaniem zasady Pareto	193
Rysunek 4.3. Rozkład danych historycznych	198
Rysunek 4.4. Wykres prawdopodobieństwa normalnego	200
Rysunek 4.5. Karta kontrolna IMR dla analizowanego procesu.....	200
Rysunek 4.6. Raport zdolności procesowej analizowanego przypadku	202
Rysunek 4.7. Struktura drzewa próbkowania – analiza systemu pomiarowego	205

Rysunek 4.8. Karta kontrolna Xbar-R – analiza systemu pomiarowego	206
Rysunek 4.9. Karta kontrolna Xbar-R – analiza systemu pomiarowego z uwzględnieniem podziału na laborantów	206
Rysunek 4.10. Szczegółowa mapa analizowanego procesu produkcji farby jednoskładnikowej.....	210
Rysunek 4.11. Drzewo próbkowania.....	211
Rysunek 4.12. Analiza praktyczna – <i>box plot</i>	213
Rysunek 4.13. Struktura drzewa próbkowania – pierwszy etap analizy graficznej	214
Rysunek 4.14. Karta kontrolna Xbar-R – krok pierwszy	214
Rysunek 4.15. Struktura drzewa próbkowania – drugi etap analizy graficznej	215
Rysunek 4.16. Karta kontrolna Xbar-R – krok drugi	216
Rysunek 4.17. Karta kontrolna Xbar-R – uzupełnienie analizy graficznej	219
Rysunek 4.18. Wykres szeregów czasowych	225
Rysunek 4.19. Wykres rozrzutu punktów.....	226
Rysunek 4.20. Wykres efektów standaryzowanych	226
Rysunek 4.21. Wartości efektów głównych – studium przypadku.....	227
Rysunek 4.22. Wykres Pareto – efektów głównych i interakcji.....	229
Rysunek 4.23. Wykres efektu głównego D: czas utrzymania	230
Rysunek 4.24. Box plot – wpływ czynników na wartość parametru lepkości dynamicznej.....	230
Rysunek 4.25. Karta kontrolna IMR – zmienność partii pilotażowych	231

STRESZCZENIE PRACY W JĘZYKU POLSKIM

Niniejsza rozprawa doktorska przedstawia podejście ukierunkowane na równoległe zastosowanie modelu statystycznej kontroli procesu (SPC) i projektowania eksperymentu (DoE) wraz z zasadą Pareto. Brak pogłębionych analiz w obrębie strategii łączącej wskazane koncepcje w celu optymalizacji procesów poprzez minimalizację zmienności naturalnej stanowił podstawę zidentyfikowanej luki badawczej osadzonej w obszarze metodologicznym.

W efekcie głównym celem analizy prowadzonej w ramach rozprawy doktorskiej była ocena skuteczności zastosowania zasady Pareto w połączeniu z integralnym modelem statystycznej kontroli procesu oraz projektowania eksperymentu w zarządzaniu jakością procesów produkcyjnych. Realizacja studium przypadku oparta została na badaniach empirycznych w procesie produkcji farby jednoskładnikowej.

Przeprowadzone badania ilościowe obejmowały analizę statystyczną danych procesowych oraz eksperymentalne modelowanie zmiennych wpływających na jakość produktu. SPC umożliwiło monitorowanie zmienności procesu i identyfikację obszarów wymagających optymalizacji, natomiast DoE pozwoliło na systematyczne badanie wpływu kluczowych czynników na jakość produktu. Zasadę Pareto wykorzystano do priorytetyzacji czynników o największym znaczeniu, co usprawniło proces podejmowania decyzji i zwiększyło skuteczność działań doskonalących.

Otrzymane wnioski pozwoliły potwierdzić hipotezę 1: *Implementacja zasady Pareto, opisującej uniwersalną prawidłowość wskazującą na koncentrację kluczowych czynników mających największy wpływ na wynik, w połączeniu z integralnym modelem statystycznej kontroli procesu oraz projektowania eksperymentu, przyczynia się do optymalizacji zarządzania jakością w procesach produkcyjnych poprzez identyfikację oraz skuteczną kontrolę głównych źródeł zmienności*, wskazując, że zintegrowany model SPC i DoE wraz z zasadą Pareto daje możliwość pełnowymiarowego zrozumienia ciągu przyczynowo-skutkowego realizowanego procesu, obejmując logiczny ciąg działań: od identyfikacji niezgodności, poprzez zdefiniowanie obszarów dominujących w budowaniu zmienności naturalnej, aż po wskazanie pojedynczych czynników czy interakcji kształtujących jakość. Jednocześnie potwierdzono hipotezę 2: *Rozdzielczość, precyzja systemu pomiarowego oraz zastępowalność operatorów prowadzą do poprawy trafności podejmowanych decyzji*. Wykazano, że właściwa rozdzielczość systemu pomiarowego, jego precyzja oraz możliwość zastępowania operatorów mają kluczowe znaczenie dla

rzetelności uzyskiwanych wyników, co bezpośrednio wpływa na poprawność decyzji dotyczących jakości.

Proponowany model charakteryzuje się ograniczeniami, do których należą: konieczność wystąpienia normalnego rozkładu analizowanych danych, ograniczona czułość kart kontrolnych Shewharta w wykrywaniu niewielkich lub stopniowych zmian w procesie.

Dalsze badania powinny koncentrować się na opracowaniu uniwersalnego podejścia matematycznego w kartach kontrolnych, umożliwiającego ich skuteczne wykorzystanie niezależnie od rozkładu analizowanych danych oraz zwiększającego ich czułość na niewielkie zmiany w procesie.

Dysertacja została podzielona na cztery rozdziały, poprzedzone wstępem. Każdy z nich kończy się podsumowaniem kluczowych ustaleń, a całość uzupełniono zakończeniem, w którym przedstawiono wnioski wynikające z przeprowadzonych badań. Rozdział pierwszy zawiera teoretyczne wprowadzenie do zagadnień zarządzania jakością. Scharakteryzowano w nim rozwój koncepcji od klasycznych modeli, po współczesne strategie. Rozdział drugi skupia się na analizie teoretycznej narzędzi SPC. Opisano rodzaje zmienności w procesach produkcyjnych, podkreślono znaczenie analizy systemów pomiarowych oraz scharakteryzowano różne podejścia do projektowania eksperymentów. Rozdział trzeci zawiera analizę integracji SPC, DoE oraz zasady Pareto jako synergicznego podejścia do zarządzania jakością w dynamicznych środowiskach produkcyjnych. Przedstawiono także zastosowanie nowoczesnych technologii (Przemysł 4.0) w optymalizacji procesów produkcyjnych oraz minimalizacji zmienności na przykładzie zastosowania zintegrowanego modelu z zasadą Pareto. Rozdział czwarty dotyczył oceny wpływu zintegrowanego modelu oraz zasady Pareto na zrozumienie zmienności, na podstawie badań empirycznych przeprowadzonych w procesie produkcji farby jednoskładnikowej. Opisano założenia metodologiczne oraz wyniki badań.

Słowa kluczowe: zasada Pareto, statystyczna kontrola procesu (SPC), projektowanie eksperymentu (DoE), zarządzanie jakością, analiza systemów pomiarowych (MSA), Przemysł 4.0, Six Sigma, Lean, Total Quality Management (TQM)

STRESZCZENIE PRACY W JĘZYKU ANGIELSKIM

This doctoral dissertation presents an approach focused on the parallel application of the Statistical Process Control (SPC) model and Design of Experiments (DoE) combined with the Pareto principle. The absence of in-depth analyses integrating these concepts to optimize processes by minimizing natural variability constituted the foundation of the identified research gap within the methodological domain.

As a result, the primary objective of the analysis conducted in this doctoral dissertation was to assess the effectiveness of applying the Pareto principle in conjunction with an integrated model of SPC and DoE in quality management of production processes. The case study was based on empirical research conducted in the production process of single-component paint.

The quantitative research conducted included statistical analysis of process data and experimental modeling of variables influencing product quality. SPC enabled the monitoring of process variability and the identification of areas requiring optimization, while DoE facilitated the systematic examination of key factors affecting product quality. The Pareto principle was used to prioritize the most significant factors, streamlining the decision-making process and enhancing the effectiveness of improvement initiatives.

The findings confirmed Hypothesis 1: *The implementation of the Pareto principle, which describes a universal pattern indicating the concentration of key factors with the greatest impact on outcomes, in combination with an integrated model of Statistical Process Control and Design of Experiments, contributes to the optimization of quality management in production processes by identifying and effectively controlling the main sources of variability.* The integrated SPC and DoE model, along with the Pareto principle, enables a comprehensive understanding of the cause-and-effect relationships within the process, encompassing a logical sequence of actions: from identifying nonconformities, through defining dominant areas contributing to natural variability, to pinpointing individual factors or interactions that shape quality.

At the same time, Hypothesis 2 was also confirmed: *Measurement system resolution, precision, and operator interchangeability lead to improved decision-making accuracy.* It was demonstrated that proper measurement system resolution, its precision, and the ability to substitute operators are crucial for the reliability of obtained results, directly influencing the accuracy of quality-related decisions.

The proposed model has certain limitations, including the requirement for a normal distribution of the analyzed data and the limited sensitivity of Shewhart control charts in detecting small or gradual changes in the process.

Future research should focus on developing a universal mathematical approach for control charts, enabling their effective application regardless of the distribution of analyzed data and enhancing their sensitivity to small changes in the process.

The dissertation is divided into four chapters, preceded by an introduction. Each chapter concludes with a summary of key findings, while the entire work is complemented by a final section presenting conclusions drawn from the conducted research. The first chapter provides a theoretical introduction to quality management, outlining the evolution of concepts from classical models to modern strategies. The second chapter focuses on the theoretical analysis of SPC tools, describing types of variability in production processes, emphasizing the importance of measurement system analysis, and characterizing various approaches to experimental design. The third chapter presents an analysis of the integration of SPC, DoE, and the Pareto principle as a synergistic approach to quality management in dynamic production environments. It also explores the application of modern Industry 4.0 technologies in process optimization and variability reduction through the implementation of the integrated model with the Pareto principle. The fourth chapter assesses the impact of the integrated model and the Pareto principle based on empirical research conducted in the production of single-component paint. It describes the methodological framework and presents the research findings.

Keywords: Pareto principle, Statistical Process Control (SPC), Design of Experiments (DoE), quality management, measurement system analysis (MSA), Industry 4.0, Six Sigma, Lean, Total Quality Management (TQM)