

Akademia WSB

Dąbrowa Górnicza, Cieszyń, Olkusz, Żywiec, Kraków

Wydział Nauk Stosowanych

mgr inż. Maciej Piotr Kardas

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

Autoreferat pracy doktorskiej napisanej pod kierunkiem:

promotor: dr hab. Aleksy Kwiliński, prof. AWSB

promotor pomocniczy: prof. dr hab. Jan Polcyn

Dąbrowa Górnicza 2025

Spis treści

1. Przesłanki wyboru tematu pracy	3
2. Cel pracy i hipotezy badawcze	6
3. Przebieg badań i struktura pracy	7
4. Wyniki badań w kontekście hipotez badawczych	12
5. Wnioski z badań	13
6. Wartość dodana pracy	14
7. Kierunki dalszych badań	15
8. Plan pracy	16

1. Przesłanki wyboru tematu pracy

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

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. Makieli, M.M. Stuss, R. Borowieckiego, Routledge, London 2021, s. 47–63; E. Molendowski, K. Nawracaj-Grygiel, M. Ulbrych, *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. Kvasko, L. Shenderivs'ka, *Efficiency of the Enterprise's Operating Activity and Its Evaluation*, „Naukovy 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.

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

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.

Pomimo istotnej dynamiki rozwoju podejść do zarządzania jakością, zaobserwowano brak pogłębionych analiz w obrębie strategii integrujących zasadę Pareto, statystyczną kontrolę procesu (SPC) oraz projektowanie eksperymentu (DoE) w ramach jednego spójnego modelu. Zidentyfikowana **luka badawcza** w obszarze metodologicznym stanowiła podstawę podjęcia niniejszych badań. 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 w kontekście systematycznego zarządzania jakością⁸. Zasada Pareto,

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.

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,

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.

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?

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.

Dotychczasowy dorobek naukowy wskazuje na wielowymiarowość podejmowanej tematyki, co wymagało 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 pozwoliły 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?

Oryginalność proponowanego rozwiązania w obszarze wypełnienia luki metodologicznej polegała na opracowaniu ilościowego podejścia do zarządzania jakością procesów produkcyjnych, które integruje zasadę Pareto z modelem statystycznej kontroli procesu oraz projektowania eksperymentu. Wdrożone metody pozwalają na systematyczne monitorowanie i całościową optymalizację przebiegów produkcyjnych, ze szczególnym uwzględnieniem aspektów jakościowych.

2. Cel pracy i hipotezy badawcze

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.

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

H1: 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.

H2: Rozdzielczość, precyzja systemu pomiarowego oraz zastępowalność operatorów prowadzą do poprawy trafności podejmowanych decyzji.

3. Przebieg badań i struktura pracy

Przedmiotem badania była 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 euro¹².

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.

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 1 pt. *Schemat integralnego modelu statystycznej kontroli procesu i projektowania eksperymentu z wykorzystaniem zasady Pareto*. Zastosowane metody i narzędzia umożliwiają systematyczne monitorowanie oraz kompleksową optymalizację procesów produkcyjnych, ze szczególnym uwzględnieniem zarządzania jakością.

¹² Dyrektywa Delegowana Komisji (UE) 2023/2775...

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.

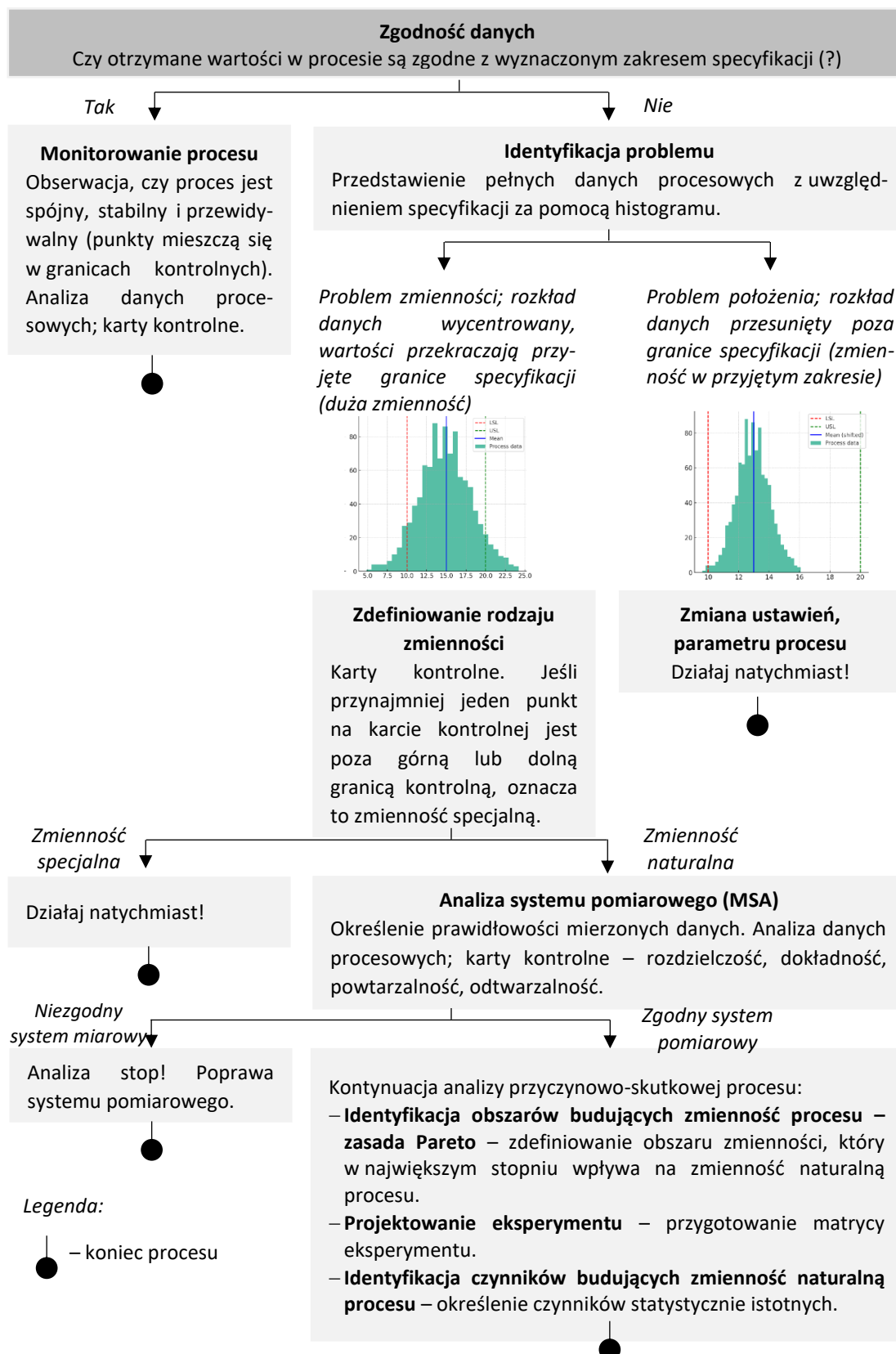
Po ustaleniu rodzaju zmienności niezbędna jest weryfikacja systemu pomiarowego (MSA) w celu zapewnienia prawidłowego zbierania danych. System pomiarowy powinien charakteryzować się zdecydowanie mniejszą zmiennością niż sam proces. Analiza MSA, wykorzystująca karty kontrolne $\bar{X}$ -R, pozwala ocenić 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 $\bar{X}$) 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.

Rysunek 1. Schemat integralnego modelu statystycznej kontroli procesu i projektowania eksperymentu z wykorzystaniem zasady Pareto



Źródło: opracowanie własne na podstawie: D.J. Wheeler, D.S. Chambers, *Understanding statistical process control*, SPC Press, 2010, s. 1–428; M.J. Anderson, P.J. Whitcomb, *DOE simplified: Practical tools for effective experimentation*, CRC Press, 2015, s. 1–268

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

badania 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 stanowi nowatorskie podejście do zarządzania jakością, integrując klasyczne i nowoczesne narzędzia w dynamicznych środowiskach produkcyjnych.

4. Wyniki badań w kontekście hipotez badawczych

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.

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.

5. Wnioski z badań

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.

W analizowanym przypadku kompleksowość podejścia 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 było podjęcie działań ukierunkowanych na dominujące obszary, z wykorzystaniem zasady Pareto, koncentrując się na najistotniejszych czynnikach wpływających na jakość procesu.

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 efektywne¹³.

6. Wartość dodana pracy

Przedstawiony w pracy model zarządzania jakością, oparty na integracji zasady Pareto, metody statystycznej kontroli procesu (SPC) oraz projektowania eksperymentu (DoE), wnosi istotny wkład zarówno w rozwój dyscypliny nauk o jakości, jak i w praktykę przemysłową związaną z optymalizacją procesów produkcyjnych. Stanowi przykład skutecznego połączenia narzędzi analizy danych z praktyką doskonalenia procesów w rzeczywistym środowisku produkcyjnym.

Z perspektywy naukowej, istotą opracowanego rozwiązania jest wykorzystanie zasady Pareto do priorytetyzacji działań jakościowych, z jednoczesnym zastosowaniem metod SPC i DoE do identyfikacji oraz analizy zmiennych wpływających na finalną jakość produktu. Model umożliwia zdefiniowanie relacji przyczynowo-skutkowych w procesie, wspiera interpretację danych oraz pozwala na podejmowanie trafnych decyzji optymalizacyjnych.

¹³ Ł. Sułkowski, *Kultura jakości w zarządzaniu, czyli pomiędzy tożsamością a kulturą organizacyjną*, „Przedsiębiorczość i Zarządzanie” 2013, t. 14, z. 8, s. 25–37.

W ujęciu praktycznym rozwiązanie zostało zastosowane w studium przypadku dotyczącym produkcji farby jednoskładnikowej. Analiza wykazała, że zastosowanie kart kontrolnych (SPC) umożliwia efektywne monitorowanie procesu, identyfikację rodzaju zmienności (naturalna vs. specjalna) oraz utrzymanie stabilności operacyjnej. Projektowanie eksperymentu (DoE) pozwoliło na planowe testowanie zmiennych wejściowych i ocenę ich wpływu na jakość produktu, co ułatwiło optymalizację ustawień procesowych. Model cechuje się etapowością, spójnością i zdolnością do adaptacji w różnych środowiskach produkcyjnych.

Rozwiązanie wpisuje się w założenia normy ISO 9001, w szczególności w obszarze ciągłego doskonalenia, wykorzystania danych do podejmowania decyzji oraz systemowego podejścia do zarządzania jakością.

7. Kierunki dalszych badań

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 odchyłń, 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 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

pozwoлиłoby 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 środowiska¹⁴.

8. Plan pracy

SŁOWNIK

WSTĘP

ROZDZIAŁ 1. WPROWADZENIE

- 1.1. Istota procesu zarządzania jakością
- 1.2. Zarządzanie jakością w procesach produkcyjnych
- 1.3. Koncepcje zarządzania jakością
 - 1.3.1. Zarządzanie jakością totalną
 - 1.3.2. Lean jako system doskonalenia
 - 1.3.3. Six Sigma – strategia redukcji zmienności w procesach
- 1.4. Definicje jakości
- 1.5. Znaczenie jakości w różnych obszarach funkcjonowania przedsiębiorstwa
- 1.6. Wprowadzenie do zasady Pareto
- 1.7. Zastosowanie zasady Pareto w zarządzaniu jakością
 - 1.7.1. Analiza bibliometryczna
 - 1.7.2. Ograniczenia realizowanych analiz oraz wnioski
- 1.8. Podsumowanie

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

¹⁴ 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.

- 2.1. Znaczenie statystycznej kontroli procesu
- 2.2. Narzędzia statystycznej kontroli procesu
 - 2.2.1. Karty kontrolne
 - 2.2.2. Histogram
 - 2.2.3. Diagram Pareto
 - 2.2.4. Wykres rozrzutu (punktowy)
 - 2.2.5. Diagram przyczynowo-skutkowy
 - 2.2.6. Wskaźniki zdolności procesu
- 2.3. Rodzaje zmienności w procesach
- 2.4. Analiza systemu pomiarowego
- 2.5. Mapowanie procesu
- 2.6. Projektowanie eksperymentów
 - 2.6.1. Metody eksperymentowania
 - 2.6.2. Eksperyment pełnoczynnikowy a frakcjonowany – wzajemne ograniczenia
- 2.7. Podsumowanie

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
- 3.2. Proaktywne podejście do zarządzania jakością poprzez SPC i DoE
- 3.3. Synergiczne zastosowanie SPC, DoE i zasady Pareto w optymalizacji procesów
- 3.4. Przemysł 4.0: nowoczesne zastosowanie SPC, DoE i zasady Pareto w zarządzaniu jakością
- 3.5. Podsumowanie

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

- 4.1. Problematyka badań
- 4.2. Przedmiot badania
- 4.3. Ogólne założenia metodyczne pracy doktorskiej
- 4.4. Badania empiryczne

- 4.4.1. Analiza zgodności danych oraz identyfikacja rodzaju problemu i zmienności
- 4.4.2. Analiza systemu pomiarowego
- 4.4.3. Identyfikacja obszarów budujących zmienność procesu
- 4.4.4. Projektowanie eksperymentu i ograniczenia wnioskowania
- 4.5. Ograniczenia modelu SPC i DoE w połączeniu z zasadą Pareto
- 4.6. Podsumowanie

ZAKOŃCZENIE

BIBLIOGRAFIA

WYKAZ TABEL

WYKAZ RYSUNKÓW

STRESZCZENIE PRACY W JĘZYKU POLSKIM

STRESZCZENIE PRACY W JĘZYKU ANGIELSKIM