



**Politechnika
Śląska**

WYDZIAŁ MECHANICZNY TECHNOLOGICZNY

PRACA DOKTORSKA

mgr inż. Łukasz RUDOLF

**OPTIMALIZACJA PROCESU ROZWOJU I INDUSTRIALIZACJI PRODUKTU
NA PRZYKŁADZIE AMORTYZATORÓW STEROWANYCH ELEKTRONICZNIE**

Promotor:

dr hab. inż. Marek T. Roszak, Prof. PŚ

Opiekun z przemysłu:

mgr inż. Adam Graczyk

Gliwice 2025

**Niniejsza praca doktorska została zrealizowana w ramach programu
Ministerstwa Nauki i Szkolnictwa Wyższego
„Doktorat Wdrożeniowy V”.**

SPIS TREŚCI

Streszczenie/Abstract

Glosariusz

1. Wstęp

2. Przegląd piśmiennictwa

- 2.1 Podejście do planowania jakości produktów i procesów produkcyjnych w ujęciu historycznym
- 2.2 Współczesne dylematy w podejściu do planowania jakości produktów i procesów produkcyjnych
- 2.3 Standardy normatywne i technologie cyfrowe w planowaniu jakości produktów i procesów produkcyjnych
- 2.4 Instrumentarium planowania jakości produktu i procesu oraz czynniki wpływające na jego skuteczność
- 2.5 Luka badawcza i uzasadnienie podjęcia tematyki pracy

3. Badania własne

- 3.1. Cele i hipoteza badań oraz założenia badawcze
- 3.2 Charakterystyka produktu i procesu
 - 3.2.1 Charakterystyka produktu
 - 3.2.2 Charakterystyka i porównanie produktów konwencjonalnych oraz mechatronicznych
 - 3.2.3 Charakterystyka procesu
- 3.3 Diagnoza stanu i identyfikacja niezgodności
- 3.4 Zakres i ograniczenia badań
- 3.5 Metodyka badawcza
- 3.6 Etapy realizacji badań
- 3.7 Projektowanie i wdrożenie instrumentów planowania jakości
 - 3.7.1 Wprowadzenie do instrumentu Design Review
 - 3.7.2 Charakterystyka Design Review
 - 3.7.3 Ewolucja rozwoju instrumentu Design Review
 - 3.7.4 Prezentacja wyników wdrożenia Design Review
 - 3.7.5 Wprowadzenie do instrumentu Problem Definition Tool
 - 3.7.6 Charakterystyka formularza Problem Definition Tool
 - 3.7.7 Prezentacja wyników wdrożenia Problem Definition Tool
 - 3.7.8 Wprowadzenie do instrumentu Technical Review
 - 3.7.9 Charakterystyka instrumentu Technical Review
 - 3.7.10 Prezentacja wyników wdrożenia Technical Review

4. Analiza wyników i ocena skuteczności wdrożonych rozwiązań

- 4.1 Ocena skuteczności wdrożenia Design Review
- 4.2 Ocena skuteczności wdrożenia Problem Definition Tool
- 4.3 Ocena skuteczności wdrożenia Technical Review
- 4.4. Ocena wpływu wdrożonych instrumentów na proces planowania jakości
- 4.5. Możliwości rozwoju i doskonalenia opracowanych instrumentów planowania jakości

5. Wnioski

Literatura

Spis tabel i rysunków

str.

1

6

6

25

47

52

58

61

61

65

65

74

75

79

90

92

94

96

97

99

106

108

132

136

141

149

151

158

170

170

181

187

193

200

202

204

213

Streszczenie

Praca doktorska pt. „Optymalizacja procesu rozwoju i industrializacji produktu, na przykładzie amortyzatorów sterowanych elektronicznie” dotyczy problematyki doskonalenia procesu planowania jakości produktu, poprzez opracowanie i wdrożenie autorskich instrumentów planowania jakości. Badania przeprowadzono w warunkach przemysłowych w międzynarodowym przedsiębiorstwie branży motoryzacyjnej, w dziale rozwoju produktu. Przeprowadzone badania i analizy dotyczyły procesu eskalacji ryzyk związanych z występującymi niezgodnościami w procesie planowania jakości – zarówno w ujęciu ilościowym, obejmującym liczbę i kategorie niezgodności, jak i jakościowym.

W ramach przeprowadzonych badań opracowano i wdrożono trzy instrumenty planowania jakości, dostosowane do specyfiki analizowanego produktu. *Design Review* miał na celu zapewnienie spójności, kompletności i zgodności dokumentacji technicznej produktu oraz eliminację niezgodności mogących eskalować w dalszych fazach rozwoju projektu. *Technical Review* został zdefiniowany jako uporządkowana ocena danych technicznych i zgodności projektu z wymaganiami oraz możliwościami procesu produkcyjnego, ukierunkowana na wczesną identyfikację ryzyk. *Problem Definition Tool* opracowano w celu ujednolicenia sposobu opisu i prezentacji niezgodności, tak aby usprawnić komunikację, podejmowanie decyzji i zapewnić kompletność danych wejściowych dla dalszych analiz.

Skuteczność opracowanych i wdrożonych instrumentów planowania jakości weryfikowano na podstawie wskaźników jakościowych. W przypadku *Design Review* *Technical Review* analizowano liczbę i kategorie niezgodności oraz ich wpływ na eskalację ryzyka. *Problem Definition Tool* weryfikowano, badając stopień kompletności formularzy oraz liczbę iteracji prowadzących do trwałego usunięcia niezgodności.

Uzyskane wyniki badań potwierdziły skuteczność wdrożonych rozwiązań. Wdrożenie *Design Review* umożliwiło zapewnienie spójności, kompletności i zgodności dokumentacji technicznej produktu oraz eliminacja niezgodności mogących eskalować w dalszych fazach rozwoju projektu. Wdrożenie *Technical Review* umożliwiło uporządkowane oceny danych technicznych i zgodności projektu z wymaganiami oraz możliwościami procesu produkcyjnego (wykonalnością) w celu wczesnej identyfikacji ryzyk. *Problem Definition Tool* ujednolicił sposób opisu i prezentacji niezgodności w celu usprawnienia komunikacji, podejmowania decyzji oraz zapewnienia odpowiednich i kompletnych danych.

Podsumowując, opracowane i wdrożone instrumenty planowania jakości znacząco zwiększyły skuteczność identyfikacji i eliminacji niezgodności w procesie rozwoju amortyzatorów sterowanych elektronicznie. Umożliwiły one ograniczenie eskalacji ryzyka, stanowiąc uzupełnienie dotychczas stosowanego w przedsiębiorstwie inżynierskiego instrumentarium planowania jakości, wpływając na kompletność danych i ułatwiając podejmowanie decyzji inżynierskich w kluczowych fazach rozwoju i industrializacji produktu.

Abstract

The doctoral dissertation entitled “Optimization of the product development and industrialization process, on the example of electronically controlled shock absorbers” concerns improving product quality planning through the development and implementation of proprietary quality-planning instruments. The research was conducted under industrial conditions in the product development department of a multinational automotive company. The studies and analyses addressed risk escalation related to nonconformities in quality planning—examined quantitatively (number and categories of nonconformities) and qualitatively.

As part of the conducted research, three quality planning instruments were developed and implemented, tailored to the specificity of the analysed product. Design Review was intended to ensure the consistency, completeness, and compliance of the product’s technical documentation and to eliminate nonconformities that could escalate in subsequent phases of project development. Technical Review was defined as a structured assessment of technical data and of the project’s conformity with requirements and with the capabilities of the manufacturing process, aimed at early risk identification. The Problem Definition Tool was developed to standardize the manner of describing and presenting nonconformities, in order to streamline communication, support decision-making, and ensure the completeness of input data for further analyses.

The effectiveness of the developed and implemented quality-planning instruments was verified on the basis of quality indicators. In the case of the Design Review and Technical Review, the number and categories of nonconformities and their impact on risk escalation were analysed. The Problem Definition Tool was verified by examining the degree of completeness of the forms and the number of iterations leading to the permanent elimination of nonconformities.

The research results confirmed the effectiveness of the implemented solutions. Design Review ensured the consistency, completeness, and compliance of technical documentation and eliminated nonconformities that could escalate in later project phases. Technical Review enabled a structured assessment of technical data and conformity with requirements and manufacturing capabilities (feasibility) for early risk identification. The Problem Definition Tool standardized how nonconformities are described and presented, streamlining communication, supporting decisions, and ensuring complete, fit-for-purpose data.

In summary, the developed and implemented quality-planning instruments significantly increased the effectiveness of identifying and eliminating nonconformities in the development process of electronically controlled shock absorbers. They enabled a reduction in risk escalation, constituting a complement to the engineering quality-planning toolkit previously used in the enterprise, influencing the completeness of data and facilitating engineering decision-making in the key phases of product development and industrialization.

Glosariusz

Grupa	Akronim / Termin	Charakterystyka
Planowanie jakości	APQP (Advanced Product Quality Planning) (Zaawansowane Planowanie Jakości)	Zaawansowane planowanie jakości produktu to ustrukturyzowany proces, który obejmuje cały cykl życia produktu – od jego koncepcji i projektowania, poprzez produkcję, aż po wdrożenie na rynek. Jego celem jest dostarczenie produktu, który w pełni spełnia oczekiwania klienta, minimalizując ryzyko wystąpienia niezgodności.
Planowanie jakości	PPAP (Production Part Approval Process) (Proces zatwierdzenia części produkcyjnej)	Proces zatwierdzania części do produkcji, który umożliwia dostawcy i producentowi potwierdzenie, że części wytwarzane seryjnie spełniają wymagania techniczne i jakościowe. Dokumentacja PPAP obejmuje m.in. wyniki testów, dane o procesach i próbkach wyrobu.
Planowanie jakości	FMEA (Failure Mode and Effects Analysis) (Analiza Przyczyn i Skutków Wad)	Metoda systematycznej identyfikacji potencjalnych wad w produktach lub procesach, oceny ich skutków oraz wprowadzenia działań zapobiegawczych. FMEA pozwala na minimalizację ryzyka na wczesnych etapach projektowania lub produkcji.
Planowanie jakości	DFMEA (Design Failure Mode and Effects Analysis) (Analiza Przyczyn i Skutków Wad dla Produktu)	Analiza FMEA skupiająca się na projektowaniu produktu. Jej celem jest zidentyfikowanie potencjalnych problemów, które mogą wynikać z błędów projektowych, oraz ich eliminacja przed wprowadzeniem produktu do produkcji.
Planowanie jakości	PFMEA (Process Failure Mode and Effects Analysis) (Analiza Przyczyn i Skutków Wad dla Procesu)	Analiza FMEA koncentrująca się na procesach produkcyjnych. Pomaga identyfikować potencjalne awarie procesów, oceniać ich skutki oraz wdrażać działania korygujące i zapobiegawcze.
Planowanie jakości	CP Control Plan Plan Kontroli	Dokument opisujący, jak monitorować proces produkcji, aby utrzymać wymagany poziom jakości.
Planowanie jakości	QFD (Quality Function Deployment) (Rozwinięcie Funkcji Jakości)	Metoda tłumaczenia potrzeb klienta na szczegółowe specyfikacje techniczne produktu.
Planowanie jakości	MSA (Measurement System Analysis) (Analiza Systemów Pomiarowych)	Analiza dokładności i powtarzalności urządzeń pomiarowych używanych w procesie kontroli jakości.
Planowanie jakości	SPC (Statistical Process Control)	Metoda statystyczna używana do kontrolowania i analizowania zmienności procesów produkcyjnych.
Planowanie jakości	Run@Rate (Test Serii Próbnnej)	Test sprawdzający zdolność linii produkcyjnej do wytwarzania produktów na wymaganym poziomie jakości i ilości.
Rozwiązywanie problemów (Problem Solving)	8D Analysis Analiza 8D	Metoda rozwiązywania problemów jakościowych w ośmiu krokach, w tym identyfikacja przyczyn i wdrożenie działań zapobiegawczych.
Rozwiązywanie problemów (Problem Solving)	Ishikawa Diagram	Diagram przyczyn i skutków, pomagający zidentyfikować źródła problemów w procesach.
Rozwiązywanie problemów (Problem Solving)	5 Why (5 x Dlaczego)	Technika polegająca na zadawaniu pięciokrotnie pytania „dlaczego”, aby znaleźć przyczynę źródłową problemu.
Rozwiązywanie problemów (Problem Solving)	PDCA (Plan-Do-Check-Act) (Planu-Wykonaj-Sprawdź-Działaj)	Cykl ciągłego doskonalenia, obejmujący planowanie, wdrażanie, kontrolę i działania doskonalące.
Rozwiązywanie problemów (Problem Solving)	A3 Problem Solving Formularz A3	Metoda rozwiązywania problemów poprzez systematyczne przedstawienie sytuacji na formularzu w formacie A3.

Rozwiązywanie problemów (Problem Solving)	Root Cause Analysis (RCA) Analiza przyczyn źródłowych problemu	Analiza przyczyn źródłowych problemu, aby zapobiec ich ponownemu wystąpieniu.
Rozwiązywanie problemów (Problem Solving)	Corrective action Działanie korygujące	Działania mające na celu eliminację przyczyn problemu i zapewnienie, że nie wystąpi on ponownie.
Rozwiązywanie problemów (Problem Solving)	Containment Actions Działanie zabezpieczające	Działania tymczasowe ograniczające skutki problemu, zanim zostaną wdrożone rozwiązania trwałe.
Rozwiązywanie problemów (Problem Solving)	Improvement actions Działania doskonalące	Szersze usprawnienia procesu, produktu lub systemu, wychodzące poza samą niezgodność, aby podnieść ogólną efektywność.
Rozwiązywanie problemów (Problem Solving)	Preventive actions Działania prewencyjne	Działania inicjowane na podstawie analizy ryzyka, trendów lub audytów, jeszcze przed pojawieniem się problemu.
Standardy w branży motoryzacyjnej	IATF 16949	IATF 16949 (International Automotive Task Force 16949) – Międzynarodowy standard określający wymagania dla systemów zarządzania jakością w przemyśle motoryzacyjnym.
Standardy w branży motoryzacyjnej	VDA 6.3	VDA 6.3 (Verband der Automobilindustrie 6.3) – Standard audytów procesów, stosowany głównie w przemyśle motoryzacyjnym w Niemczech.
Standardy w branży motoryzacyjnej	ISO 26262	ISO 26262 (International Organization for Standardization 26262) – Norma określająca wymagania dotyczące bezpieczeństwa funkcjonalnego systemów elektronicznych w pojazdach.
Standardy w branży motoryzacyjnej	AIAG Standards	AIAG Standards (Automotive Industry Action Group Standards) – Amerykańskie standardy planowania jakości, takie jak APQP, PPAP czy FMEA.
Six Sigma	DMAIC (Define-Measure-Analyze-Improve-Control) / (Definiuj-Mierz-Analizuj-Udoskonalaj-Kontroluj)	Pięcioletni cykl doskonalenia procesów istniejących w celu redukcji zmienności.
Six Sigma	DMADV (Define-Measure-Analyze-Design-Verify) / (Definiuj-Mierz-Analizuj-Projektuj-Weryfikuj)	Metoda Six Sigma stosowana do projektowania nowych procesów lub produktów od podstaw.
Six Sigma	Critical to Quality (CTQ) Wymaganie krytyczne dla jakości	Kluczowe parametry jakościowe, które są najważniejsze z punktu widzenia produktu i klienta.
Lean	Metoda 5S	Metoda organizacji miejsca pracy, obejmująca sortowanie, systematykę, sprzątanie, standaryzację i utrzymanie porządku.
Lean	Value Stream Mapping (VSM) Mapowanie strumienia wartości	Mapowanie przepływu wartości w procesie produkcyjnym w celu identyfikacji strat.
Lean	Kanban	System wizualnego zarządzania zapasami i przepływem pracy w procesach produkcyjnych.
Lean	Jidoka	Automatyzacja z wbudowaną kontrolą jakości; zatrzymanie procesu w przypadku wykrycia problemu.
Lean	Muda	Straty wynikające z marnotrawstwa w procesach, np. nadprodukcji czy zbędnych ruchów.
Lean	Mura	Nierównomierności w procesach powodujące straty i obniżenie wydajności.
Lean	Muri	Przeciążenie maszyn, pracowników lub zasobów, prowadzące do spadku jakości.
Lean	Gemba Walk	Obserwacja procesu w miejscu jego realizacji w celu zidentyfikowania obszarów wymagających poprawy.

1. Wstęp

Tematyka i zakres rozprawy odnoszą się do aktualnych kierunków badawczych w obszarze dyscypliny naukowej inżynieria mechaniczna i związanej z nią subdyscypliny inżynieria produkcji w zakresie specjalności inżynieria jakości. Znaczenie zagadnienia optymalizacji procesu rozwoju i industrializacji produktu w warunkach rosnącej złożoności technicznej produktu i wymagań stanowi o istotności badanego problemu. w niniejszej pracy zagadnienie to analizowane jest w zakresie projektu doktorskiego poświęconego doskonaleniu inżynierskiego instrumentarium planowania jakości z uwzględnieniem specyfiki produktów mechatronicznych oraz ich weryfikacji w warunkach przemysłowych.

1.1. Wprowadzenie do tematyki planowania jakości produktu i procesu

Planowanie jakości produktu i procesu produkcyjnego stanowi fundamentalne kryterium warunkujący zapewnienie spełnienia określonych wymagań technicznych, prawnych oraz klientów przez produkt końcowy. w przeciwieństwie do kontroli jakości, która koncentruje się na wykrywaniu i eliminacji wad w gotowym produkcie, planowanie jakości skupia się na działaniach prewencyjnych umożliwiających minimalizację ryzyka już na etapie projektowania i wdrażania produktu [1-2].

Współczesne standardy jakościowe dla branży motoryzacyjnej, takie jak IATF 16949 (International Automotive Task Force), VDA (Verband der Automobilindustrie), AIAG (Automotive Industry Action Group) czy ISO 9001 (International Organization for Standardization – Quality Management Systems), kładą szczególny nacisk na zintegrowane podejście do procesu planowania jakości produktu i procesu. Podejście to uwzględnia analizę potencjalnych niezgodności, ocenę ryzyka oraz wdrażanie instrumentów eliminujących potencjalne niezgodności jeszcze przed rozpoczęciem produkcji seryjnej. Szczególne znaczenie ma metodologia APQP (Advanced Product Quality Planning), FMEA (Failure Mode and Effects Analysis) oraz SPC (Statistical Process Control), które pozwalają na efektywne monitorowanie jakości i zwiększenie stabilności procesu wdrażania nowych produktów [3, 1S-7S].

Wysoka złożoność współczesnych produktów mechatronicznych wymaga holistycznego podejścia do planowania ich jakości, obejmującego zarówno aspekty techniczne, jak niezawodność czy trwałość poszczególnych komponentów, jak również kwestie związane z ich interoperacyjnością oraz kompatybilnością. Wymaga to interdyscyplinarnego podejścia oraz współpracy zespołów projektowych wewnątrz organizacji [4].

1.2. Planowanie jakości i jego rola w zapewnianiu zgodności produktów z wymaganiami

Planowanie jakości to proces zapewniający pełną zgodność produktu z wymaganiami klientów, przepisami prawnymi oraz wewnętrznymi standardami organizacji. Spełnienie wymagań nie

tylko umożliwia wprowadzenie produktu na rynek, ale także wpływa na jego niezawodność, trwałość i bezpieczeństwo użytkowania [5-6].

Wymagania klientów obejmują zarówno funkcjonalność, jak i oczekiwania dotyczące jakości, komfortu użytkowania oraz długoterminowej niezawodności. W kontekście produktów mechatronicznych istotne jest nie tylko spełnienie podstawowych założeń technicznych, ale także ich adaptacja do zmiennych warunków eksploatacyjnych [7].

Normy, standardy i regulacje prawne, takie jak: IATF 16949, ISO 26262 (Pojazdy drogowe - Bezpieczeństwo funkcjonalne) oraz dyrektywy UE, określają ścisłe kryteria bezpieczeństwa, wpływu na środowisko oraz trwałości produktu. Organizacje są zobowiązane do wdrażania podejścia systemowego do planowania jakości, które zapewnia zgodność produktu z obowiązującymi regulacjami na każdym etapie jego rozwoju [8, 2S, 10S].

Wewnętrzne standardy organizacyjne są kluczowe dla utrzymania spójności procesów projektowych i technologicznych a także efektywności wdrażania nowych technologii. Organizacje często opracowują własne wytyczne dotyczące metod testowania, dopuszczalnych odchyłek parametrów technicznych produktu oraz procedur planowania i zapewnienia jakości, co pozwala na lepszą kontrolę cyklu życia produktu [9].

1.3 Praktyczne znaczenie planowania jakości w przemyśle motoryzacyjnym

Przemysł motoryzacyjny charakteryzuje się wyjątkowo wysokimi wymaganiami dotyczącymi jakości i bezpieczeństwa produktów. Produkty wykorzystywane w pojazdach muszą spełniać surowe normy regulacyjne oraz podlegać rygorystycznym testom wytrzymałościowym, co sprawia, że planowanie jakości staje się niezbędnym procesem warunkującym kształtowanie produktu od fazy planowania po produkcję seryjną, użytkowanie i utylizację [10].

Jednym z kluczowych aspektów planowania jakości produktu jest zapewnienie powtarzalności parametrów technicznych i technologicznych w realizacji produkcji. Wprowadzenie nowego produktu na rynek wymaga przejścia przez złożone procedury testowe, w tym badania odporności na warunki skrajne użytkowania produktu, analizę wpływu długotrwałej eksploatacji oraz testy kompatybilności poszczególnych komponentów w systemie pojazdu.

Nieodłącznym elementem planowania jakości produktu i procesu w przemyśle motoryzacyjnym jest analiza ryzyka związanego z potencjalnymi awariami i ich konsekwencjami dla bezpieczeństwa użytkownika. Proces ten polega na identyfikacji możliwych scenariuszy niezgodności, ocenie ich prawdopodobieństwa oraz określeniu skali skutków. Na tej podstawie tworzone są działania zapobiegawcze i plany walidacji, które pozwalają ograniczyć ryzyko jeszcze przed rozpoczęciem produkcji seryjnej. Skuteczna analiza ryzyka wspiera podejmowanie decyzji projektowych, zwiększa niezawodność produktu i zapewnia, że wytwarzany produkt spełnia wymagania jakościowe i bezpieczeństwa nawet w warunkach długotrwałej eksploatacji [11-13].

Opracowanie i wdrożenie skutecznych inżynierskich instrumentów planowania jakości pozwala nie tylko na minimalizację ryzyka wystąpienia wad, ale także na optymalizację procesu wdrażania nowego produktu poprzez skrócenie cyklu rozwojowego, ograniczenie kosztów oraz poprawę efektywności procesu rozwoju i industrializacji produktu.

1.4 Cel badawczy i przedmiot pracy

Rozprawa „Optymalizacja procesu rozwoju i industrializacji produktu na przykładzie amortyzatorów sterowanych elektronicznie” ma na celu ocenę skuteczności i efektywności wdrożenia wybranych instrumentów planowania jakości w procesach rozwoju i industrializacji nowoczesnych produktów mechatronicznych.

Przedmiotem badań są amortyzatory sterowane elektronicznie, wybrane jako przykład współczesnych systemów mechatronicznych charakteryzujących się integracją komponentów mechanicznych, elektronicznych i hydraulicznych. Ten wybór wynika z praktycznych wyzwań, jakie te produkty stawiają przed tradycyjnymi metodologiami planowania jakości oraz z ich znaczenia dla przemysłu motoryzacyjnego jako przykładu złożonych systemów technicznych wymagających interdyscyplinarnego podejścia.

Zakres przeprowadzonych badań koncentruje się na identyfikacji i optymalizacji kluczowych elementów procesu planowania jakości, które mają bezpośredni wpływ na skuteczność i efektywność procesu rozwoju i industrializacji wybranej grupy produktów. Badania obejmują analizę procesu rozwoju produktu, optymalizację jego industrializacji oraz integrację faz planowania jakości w kontekście specyficznych wymagań systemów mechatronicznych.

Sformułowana hipoteza badawcza zakłada, że **dopasowanie i wdrożenie wybranych instrumentów planowania jakości ma istotny wpływ na poprawę skuteczności i efektywności procesu rozwoju oraz industrializacji nowoczesnych produktów mechatronicznych.** Weryfikacja tej hipotezy została przeprowadzona poprzez empiryczną analizę wpływu zastosowanych rozwiązań jakościowych na stabilność procesów wdrożeniowych oraz ich skuteczność w eliminacji niezgodności.

Problem badawczy adresuje praktyczną potrzebę wypełnienia luki metodologicznej w zakresie planowania jakości dedykowanego specyfice systemów mechatronicznych. Dotychczasowe podejścia nie uwzględniają w pełni wyzwań związanych z synchronizacją różnych obszarów technicznych oraz odmiennymi cyklami rozwoju poszczególnych komponentów systemów wchodzących w skład złożonych systemów, co powoduje trudności w skutecznym planowaniu jakości i wdrażaniu innowacyjnych rozwiązań.

W toku realizacji projektu badawczego opracowano i wdrożono autorskie instrumenty planowania jakości dostosowane do specyfiki amortyzatorów sterowanych elektronicznie. Należą do nich „Design Review” służący systematycznemu przeglądowi dokumentacji projektu, „Technical Review” umożliwiający kompleksowy przegląd techniczny, „Problem Definition Tool” stanowiący ustrukturyzowane narzędzie do definiowania i komunikowania niezgodności.

Przeprowadzone badania wypełniają istotną lukę w obszarze metodologii planowania jakości poprzez opracowanie i empiryczną weryfikację dedykowanych instrumentów w rzeczywistych warunkach przemysłowych. Uzyskane wyniki stanowią rozwiązanie metodologiczne o potencjale aplikacyjnym wykraczającym poza amortyzatory sterowane elektronicznie, adresując potrzeby innych systemów mechatronicznych wymagających integracji zaawansowanych technologii oraz skutecznego planowania jakości w procesach rozwoju i industrializacji.

1.5 Objaśnienie kluczowych pojęć tematu pracy

Dla pełnego zrozumienia celów i zakresu niniejszej dysertacji kluczowe jest zdefiniowanie fundamentalnych pojęć zawartych w temacie pracy.

Optymalizacja procesu w kontekście niniejszej pracy oznacza systematyczne doskonalenie metod, narzędzi i procedur w oparciu o zasady filozofii Lean, mające na celu zwiększenie skuteczności, redukcję marnotrawstwa oraz poprawę jakości wyników dla produktu i procesu przy jednoczesnej minimalizacji zasobów i czasu potrzebnych do osiągnięcia założonych celów.

Rozwój produktu obejmuje wszystkie działania od fazy koncepcyjnej, przez projektowanie, prototypowanie, testowanie, aż do uzyskania produktu gotowego do produkcji seryjnej. Zgodnie z metodologią APQP, proces rozwoju produktu realizowany jest w ramach Fazy 1 - Planowanie i definiowanie programu (określenie wymagań klienta i założeń projektowych) oraz Fazy 2 - Projektowanie i rozwój produktu (szczegółowe projektowanie i weryfikacja koncepcji). Należy podkreślić, że rozwój produktu rzadko kończy się po realizacji wspomnianych faz - napływające dane z testów, walidacji oraz wczesnych etapów produkcji często wymagają powrotu do wcześniejszych faz i wprowadzenia modyfikacji w projekcie.

Industrializacja produktu w znaczeniu przyjętym w niniejszej dysertacji to aktywności związane z rozwojem produktu realizowane podczas wdrażania go do produkcji seryjnej, obejmujące zarządzanie zmianami technicznymi oraz zachowanie terminowości kamieni milowych harmonogramu projektu. Zgodnie z metodologią APQP, industrializacja obejmuje Fazę 3 - Projektowanie i rozwój procesu (opracowanie procesów produkcyjnych), Fazę 4 - Walidacja produktu i procesu (potwierdzenie zdolności procesów) oraz Fazę 5 - Uruchomienie, feedback i działania naprawcze (stabilizacja produkcji). Proces kończy się uruchomieniem stabilnej produkcji seryjnej potwierdzonej zatwierdzonym PPAP (Production Part Approval Process). w branży motoryzacyjnej industrializacja charakteryzuje się iteracyjnym charakterem, gdzie każda modyfikacja produktu wymaga analizy i oceny ryzyka oraz w większości przypadków ponownej walidacji zgodności z wymaganiami funkcjonalnymi oraz jakościowymi. w tej fazie dokonywanie jakichkolwiek zmian w produkcie jest niezwykle trudne, ponieważ równolegle rozwijany jest proces produkcyjny bazujący na wcześniejszej dokumentacji technicznej produktu. Podobnie jak w rozwoju produktu, industrializacja często wymaga powrotu do wcześniejszych etapów w wyniku napływających danych z produkcji próbnej i walidacji. Skuteczny nadzór nad tym etapem jest krytyczny dla zapewnienia

komercyjnego sukcesu produktu oraz minimalizacji ryzyka opóźnień w harmonogramie dostawczym.

Amortyzatory sterowane elektronicznie: to półaktywne urządzenie, w którym zawór (lub zawory) regulowany przez jednostkę ECU (Electronic Control Unit) moduluje przepływ oleju, tłumiąc drgania wywołane nierównościami drogi. Czujniki przyspieszeń, prędkości kątowej i skoku koła dostarczają ciągłych danych, dzięki czemu sterownik w czasie rzeczywistym dobiera siłę tłumienia i przywraca stabilne warunki jazdy. w porównaniu z konwencjonalnymi amortyzatorami o stałej charakterystyce hydraulicznej, amortyzatory sterowane elektronicznie są znacznie bardziej złożone zarówno pod względem sprzętowym, jak i integracją z innymi systemami, co przekłada się na wyższe koszty oraz wymagania serwisowe [14- 15].

Produkt mechatroniczny to zintegrowany zespół współdziałających systemów mechanicznych, elektronicznych, informatycznych i często hydraulicznych, tworzących spójną całość funkcjonalną. w odróżnieniu od układów konwencjonalnych, elementy te nie działają niezależnie, lecz są projektowane i sterowane jako jeden system. Zgodnie z terminologią, system definiowany jest jako kombinacja kilku komponentów, aby spełnić wybraną funkcję, podczas gdy podsystem to główna część systemu, który sam ma charakterystyki systemu, zazwyczaj składające się z kilku komponentów realizujących specyficzne funkcje w ramach systemu, w którego wchodzi w skład [16].

2. Przegląd piśmiennictwa

Współczesne inżynierskie podejście do planowania jakości produktu i procesu w przemyśle motoryzacyjnym jest efektem ewolucji podejścia do zapewnienia zgodności produktu z wymaganiami, a także metodologii projektowania inżynierskiego jakie dokonały się na przestrzeni ostatniego stulecia [17].

W początkowych etapach rozwoju branży motoryzacyjnej dominowała końcowa kontrola jakości, koncentrująca się na wykrywaniu i eliminowaniu wad gotowych produktów. Z czasem zastała ona poszerzona o tzw. podejście zapobiegawcze, oparte na koncepcji „wbudowanej jakości” (*built-in quality*), w której wymagania jakościowe uwzględniane są na etapie projektowania produktu i przygotowania jego procesu wytwarzania. Na tej podstawie zostały ukształtowane i znormalizowane metodyki, takie jak Advanced Product Quality Planning (APQP), Failure Mode and Effects Analysis (FMEA) oraz Production Part Approval Process (PPAP) które współcześnie stanowią filary inżynierskiego podejścia do planowania jakości produktów i procesów. W praktyce przemysłowej ich zastosowanie uzupełniane jest o podejścia Lean Manufacturing i Six Sigma, które pozwalają na eliminację strat i redukcję zmienności procesów oraz zwiększenie ich przewidywalności [18- 19].

Współczesne podejście do planowania jakości produktu i procesu nie ogranicza się jedynie do wdrażania ww. metodyk w formie sekwencyjnych działań. Coraz częściej przyjmuje ono formę podejścia iteracyjnego i zintegrowanego, obejmującego cały cykl życia produktu – od wczesnej jego koncepcji, poprzez jego rozwój i walidację, aż po produkcję seryjną – z licznymi sprzężeniami zwrotnymi pomiędzy poszczególnymi fazami rozwoju produktu i jego industrializacją [45].

W poniższym przeglądzie literatury (rozdziały 2.1–2.5) przedstawiono zarówno historyczne uwarunkowania, jak i aktualny stan wiedzy w zakresie planowania jakości produktu i procesu dla branży motoryzacyjnej, ze szczególnym uwzględnieniem wyzwań związanych z produktami o wysokiej złożoności technicznej. Zagadnienia te stanowią punkt wyjścia i kontekst dla realizacji niniejszego projektu doktorskiego, którego celem jest ocena skuteczności wdrożenia wybranych metod planowania jakości wykorzystywanych w procesie rozwoju i industrializacji nowoczesnych produktów mechatronicznych, na poprawę jego skuteczność i efektywności.

2.1. Podejście do planowania jakości produktów i procesów produkcyjnych w ujęciu historycznym

Podejście do inżynierskiego planowania jakości produktów i procesów produkcyjnych stanowi integralną część inżynierii produkcji, a jego formalna systematyka i podział na odrębne funkcjonalne obszary został wprowadzony dopiero w XX wieku.

Analiza historycznych technik i metod wytwarzania ujawnia charakterystyczną cechę wczesnych procesów produkcyjnych – planowanie parametrów konstrukcyjnych wyrobu oraz

planowanie parametrów technologicznych procesu stanowiły spójną całość realizowaną przez pojedynczego wykonawcę - rzemieślnika. Rzemieślnik będący zarazem projektantem i konstruktorem wytwarzanego dobra określał zarówno wymagania funkcjonalne i wytrzymałościowe wyrobu, jak i dobierał odpowiednie parametry procesu jego wytwarzania, narzędzia oraz metody kontroli. Planowanie jakości produktu i jej uzyskanie można uznać, że zależało od jednej osoby [20].

W aspekcie inżynierskim planowanie jakości produktu obejmuje definiowanie takich aspektów jak jego charakterystyk konstrukcyjnych, właściwości materiałowych, tolerancji wymiarowych oraz wymagań dotyczących niezawodności i trwałości eksploatacyjnej. Planowanie jakości procesu produkcyjnego koncentruje się na określeniu parametrów technologicznych, sekwencji operacji wytwórczych, warunków obróbki oraz metod kontroli zgodności z określonymi wymaganiami [21].

W okresie przedprzemysłowym oba aspekty (związane z planowaniem jakości wyrobu oraz procesu) nie były realizowane w sposób spójny (zintegrowany) – wytwórca posiadał kompleksową wiedzę łączącą zrozumienie właściwości mechanicznych wyrobu z praktycznymi umiejętnościami zaplanowania i wykorzystania odpowiednich technologii wytwarzania. Brak formalnego rozgraniczenia pomiędzy projektowaniem konstrukcyjnym a projektowaniem technologicznym zapewniał naturalną koherencję tychże aspektów, jednocześnie nie uwzględniał możliwości optymalizacji procesów i standaryzacji wyrobów, gdyż opierał się w zasadniczej kwestii na wiedzy i doświadczeniu rzemieślnika [22- 23].

Rewolucja przemysłowa wprowadziła fundamentalną zmianę w aspekcie organizacyjnym – funkcjonalne rozdzielenie procesu projektowania konstrukcji od procesu projektowania technologii wytwarzania. Konstruktor określał parametry wytrzymałościowe i funkcjonalne wyrobu, jednocześnie mógł nie posiadać dogłębnej wiedzy o ograniczeniach technologicznych stosowanych procesów wytwórczych. Podejście to charakteryzujące się separacją kompetencji, choć umożliwiało specjalizację inżynierską i zwiększenie skali produkcji, wygenerowała nowe problemy związane z zapewnieniem wykonalności technologicznej założeń konstrukcyjnych. Rosnąca rozbieżność pomiędzy wymaganiami projektowymi dla produktów a zdolnościami procesów produkcyjnych stała się głównym czynnikiem stymulującym rozwój sformalizowanych metodyk planowania jakości, których systematyczna ewolucja stanowi przedmiot dalszej analizy [24].

Historia problematyki planowania jakości produktu i procesu nierozzerwalnie łączy się z ewolucją podejścia do jakości w procesach produkcyjnych oraz transformacją metod projektowania i wytwarzania produktów oraz procesów produkcyjnych. Na przestrzeni ostatniego stulecia nastąpiła fundamentalna zmiana w zakresie oceny jakości produktu od prostej inspekcji końcowej produktów do kompleksowego oraz prewencyjnego planowania jakości produktów i procesów produkcyjnych, zintegrowanego z całym cyklem życia produktu. Ze względu na zakres niniejszej pracy, analiza historyczna koncentruje się na okresie od

początku XX wieku, gdy po raz pierwszy wprowadzono inżynierskie podejście do planowania jakości w procesach produkcyjnych.

Analiza kolejnych etapów rozwoju koncepcji jakości implementowanych do praktyki przemysłowej pozwala wskazać, jak zmiany w podejściu i rozumieniu jakości wpływały – i nadal wpływają – na kształtowanie współczesnego podejścia do planowania jakości produktów i procesów produkcyjnych. Pierwsze dekady XX wieku w zakresie organizacji procesów produkcyjnych charakteryzowały się podejściem opartym na inspekcji końcowej produktów. Dominowała produkcja masowa, w której kontrola jakości polegała na identyfikacji i odrzuceniu wadliwych wyrobów podczas kontroli ostatecznej. Brakowało wówczas systematycznego podejścia do analizy przyczyn problemów jakościowych dotyczących zarówno produktów, jak i procesów wytwarzania [25].

Wprowadzona przez Fredericka W. Taylora koncepcja specjalizacji zadań – w tym wyodrębnienie funkcji kontrolerów jakości odpowiedzialnych wyłącznie za inspekcję – stanowiła jeden z pierwszych kroków w kierunku uporządkowanego podejścia do organizacji nadzoru jakości. Taylor jako pierwszy sformułował zasadę, zgodnie z którą ocena jakości wymaga dedykowanych kompetencji i powinna być świadomie zaprojektowana w strukturze organizacyjnej, a nie pozostawiona przypadkowi. To podejście można uznać za załóżek współczesnego podejścia do planowania jakości – zakłada ono konieczność wcześniejszego określenia, kto, kiedy i w jaki sposób będzie odpowiedzialny za działania zapewniające jakość produktów i procesów [26].

Współczesne planowanie jakości bezpośrednio czerpie z tej koncepcji, implementując narzędzia takie jak macierze odpowiedzialności (RAM – Responsibility Assignment Matrix lub RACI – Responsible, Accountable, Consulted, Informed), które stosuje się w przemyśle motoryzacyjnym w zespołach interdyscyplinarnych ds. jakości. Na etapie planowania produktu definiuje się w nich role inżynierów jakości, projektantów i technologów w realizacji wymagań jakościowych stawianych zarówno produktom, jak i procesom [27- 28].

Kluczowym ograniczeniem wczesnego okresu rozwoju koncepcji planowania jakości produktu i procesu – przypadającego na pierwszą połowę XX wieku – było rozdzielenie planowania jakości produktu od planowania jakości procesu. Kontrola produktów opierała się głównie na inspekcji końcowej gotowych wyrobów, natomiast nadzór nad procesami ograniczał się do sporadycznych, losowo prowadzonych inspekcji, określanych jako tzw. kontrola „lotna” – działania inspekcyjne. Brak integracji pomiędzy wymaganiami dla produktu (np. specyfikacjami materiałowymi i tolerancjami) a parametrami procesu (takimi jak warunki technologiczne czy zdolność procesowa) skutkowało brakiem możliwości skutecznej prewencji i narzucało reaktywne podejście do rozwiązywania problemów jakościowych ujawniających się w procesie produkcyjnym czy użytkowaniu gotowanego wyrobu [29].

Współczesne inżynierskie podejście do planowania jakości opiera się na zasadzie spójności: każdy istotny parametr produktu musi posiadać przypisany odpowiadający mu parametr procesu wytwórczego, wraz z jasno określoną metodą nadzoru, częstotliwością kontroli oraz

kryteriami akceptacji. Takie podejście minimalizuje ryzyko odchyień i umożliwia systematyczne zapewnienie zgodności produktu z wymaganiami. Współcześnie narzędziem operacyjnym realizującym te założenia jest plan kontroli jakości (ang. *Control Plan*), który stanowi formalne powiązanie wymagań jakościowych pomiędzy konstrukcją produktu a procesem jego wytwarzania [30- 31].

Kolejnym przełomowym momentem w rozwoju planowania jakości było opracowanie kart kontrolnych w 1924 roku przez Waltera Andrew Shewhart'a, pracującego w Bell Laboratories, co zapoczątkowało tym samym wykorzystanie metod statystycznych w nadzorowaniu jakości procesów produkcyjnych. Shewhart wykazał, że zmienność jest nieodłączną cechą każdego procesu, a kluczem do jego doskonalenia jest identyfikacja i eliminacja przyczyn specjalnych, zakłócających stabilność realizacji procesu. Jego odkrycie miało fundamentalne znaczenie – po raz pierwszy udowodniono, że jakość produktu i procesu można nie tylko kontrolować, lecz także przewidywać i projektować na podstawie modeli statystycznych jeszcze przed rozpoczęciem produkcji. Karty kontrolne umożliwiły odejście od reaktywnego podejścia do jakości w kierunku planowania jakości produktu opartego na określaniu granic tolerancji oraz wymaganych wskaźników zdolności procesów, takich jak *C_p* (Process Capability Index), który opisuje potencjał procesu do utrzymania produkcji w określonym przedziale tolerancji, oraz *C_{pk}* (Process Capability Performance Index), który dodatkowo uwzględnia pozycjonowanie wartości średniej względem wartości granicznych. Wymienione wskaźniki stanowią współcześnie podstawowe narzędzia oceny stabilności i przewidywalności procesów produkcyjnych [32- 33].

Rozwinięcie opracowanej koncepcji Walter Andrew Shewhart przedstawił w publikacji z 1931 roku zatytułowanej *Economic Control of Quality of Manufactured Product*, która stała się fundamentem statystycznego podejścia do planowania jakości procesów produkcyjnych. Łącząc metody statystyczne z analizą ekonomiczną, Shewhart zaproponował rewolucyjną ideę, według której inwestycje w działania prewencyjne na etapie planowania jakości są uzasadnione ekonomicznie, ponieważ prowadzą do ograniczenia kosztów związanych z naprawami, reklamacjami i stratami produkcyjnymi. To podejście stanowi podstawę współczesnych systemów oceny kosztów jakości, opartych na modelu PAF (Prevention–Appraisal–Failure), który wspiera podejmowanie decyzji projektowych i procesowych na podstawie analizy kosztów zapobiegania, wykrywania i skutków niezgodności [34].

Warto zauważyć, że w czasach, gdy Walter Andrew Shewhart opracował swoje podejście produkty miały znacznie prostszą strukturę – były to głównie mechaniczne układy jednofunkcyjne, projektowane z myślą o trwałości i podstawowej funkcjonalności. Brakowało produktów rozbudowanych o powiązanych systemach, a proces projektowania nie uwzględniał skomplikowanych zależności pomiędzy komponentami. Wymagania użytkownika końcowego były ograniczone – jakość utożsamiano przede wszystkim z brakiem fizycznych defektów i zgodnością z podstawową specyfikacją techniczną. Współczesne inżynierskie podejście do planowania jakości produktów w tym złożonych, takich jak systemy mechatroniczne, bazuje na zasadach zaproponowanych przez Shewharta, jednak służy dziś do optymalizacji relacji

między czynnikami mającymi wpływ na koszty zapobiegania potencjalnym defektom a kosztami ich późniejszego usuwania. W tego typu produktach (systemach) – np. jak zawieszenie aktywne samochodu – koszty napraw eksploatacyjnych mogą wielokrotnie przewyższać nakłady potrzebne na wdrożenie dodatkowych mechanizmów nadzoru na etapie rozwoju i industrializacji produktu [35].

Lata 30. i 40. XX wieku przyniosły dynamiczny rozwój statystycznego planowania jakości (SQC – Statistical Quality Control). Harold Francis Dodge i Harry George Romig opracowali pierwsze plany kontroli odbiorczej, które umożliwiały ocenę jakości całej partii wyrobów na podstawie odpowiednio dobranej próbki. Rozwijając koncepcje Waltera Andrew Shewharta dotyczące przewidywalności zmienności procesów, zastosowali metody matematyczne do określania liczby badanych sztuk, kryteriów akceptacji oraz dopuszczalnego poziomu błędów. Kluczową innowacją było wprowadzenie koncepcji ryzyka – zarówno po stronie dostawcy (ryzyko odrzucenia dobrej partii), jak i odbiorcy (ryzyko przyjęcia partii wadliwej) – jako mierzalnych parametrów planowania jakości. Takie podejście umożliwiało świadome projektowanie kontroli jeszcze przed rozpoczęciem procesu produkcyjnego, optymalizując relację między kosztami a skutecznością wykrywania niezgodności. Metodologia ta stanowiła podwaliny pod naukowe projektowanie systemów kontroli stosowanych w praktyce przemysłowej i miała istotny wpływ na rozwój współczesnych praktyk, takich jak projektowanie planów kontroli w ramach procedury PPAP, gdzie poziom inspekcji dostosowywany jest do krytyczności cech produktu [36].

Druga Wojna Światowa znacząco przyspieszyła rozwój metod statystycznej kontroli jakości. Amerykański przemysł zbrojeniowy zaczął stosować standardy kontroli jakości na szeroką skalę, a Departament Wojny Stanów Zjednoczonych Ameryki Północnej wprowadził obowiązkowe szkolenia z metod statystycznych dla dostawców części i materiałów wykorzystywanych w produkcji wojskowej. Przełomowe było wprowadzenie kwalifikacji dostawców opartej na udokumentowanych zdolnościach procesowych, a nie tylko na reputacji czy wynikach wcześniejszych relacji handlowych. Po raz pierwszy wymagano przedstawienia obiektywnych i systematycznych dowodów zdolności procesów do wytwarzania wyrobów zgodnych ze specyfikacją przed podpisaniem kontraktu. Zapoczątkowało to erę planowania jakości produktu i procesu rozszerzając ją na łańcuch dostaw, gdzie ocena jakości i stabilności procesów produkcyjnych oraz zdolności do spełniania wymagań technicznych produktu stała się nieodłącznym kryterium wyboru partnerów biznesowych. Współczesne praktyki, takie jak audyty procesów np. wg VDA 6.3, ocena zdolności jakościowej na podstawie wskaźników, np. Cpk (wskaźnik zdolności procesu), oraz certyfikaty potwierdzające wdrożenie i nadzorowanie systemów zarządzania jakością, na przykład obowiązkowego dla branży motoryzacyjnej według standardu IATF 16949 (Systemy zarządzania jakością – szczegółowe wymagania dla przemysłu motoryzacyjnego, rozwinięcie ISO 9001), bezpośrednio wywodzą się z innowacyjnych podejść i rozwiązań metodologicznych tamtego okresu [37].

W 1946 roku powstało American Society for Quality Control (ASQC), które odegrało kluczową rolę w popularyzacji metod statystycznej kontroli jakości w amerykańskim przemyśle. ASQC

zapoczątkowało systematyzację metodologii planowania jakości produktu i procesu poprzez opracowywanie standardowych procedur kontroli oraz ujednolicanie terminologii związanej z jakością. Ponadto wprowadziło certyfikowane programy szkoleniowe dla specjalistów ds. jakości, profesjonalizując tym samym funkcję planowania jakości w przemyśle. Organizacja ta od początku stawiała na rozwój kompetencji praktyków ds. jakości poprzez opracowywanie i udostępnianie specjalistycznych publikacji, organizację konferencji i sieciowanie ekspertów, co przyczyniło się do trwałego wzrostu znaczenia kontroli jakości w różnych sektorach gospodarki. Działalność ASQC stanowiła fundament dla rozwoju współczesnych metod planowania jakości, których ewolucja doprowadziła do opracowania międzynarodowych standardów wymagań jakościowych, takich jak IATF 16949 (Systemy zarządzania jakością – szczegółowe wymagania dla przemysłu motoryzacyjnego, rozwinięcie ISO 9001), oraz branżowych metodologii, jak APQP (Advanced Product Quality Planning – Zaawansowane Planowanie Jakości Produktu), stosowanych współcześnie w przemyśle motoryzacyjnym. W tym wczesnym okresie rozwoju podejścia do jakości w praktyce produkcyjnej koncentrowano się jednak głównie na projektowaniu planów kontroli gotowych produktów, mających na celu wykrywanie niezgodności, a nie ich zapobieganiu, gdyż systematyczne, prewencyjne projektowanie jakości produktu w procesie rozwoju produktu jeszcze wtedy nie było stosowane [38].

W latach 50. i 60. XX wieku przełom w jakości procesów i produktów zapoczątkowali William Edwards Deming, Joseph M. Juran, Armand V. Feigenbaum oraz Kaoru Ishikawa, rozwijając filozofię Total Quality Control (TQC). Wprowadzili oni podejście stawiające na zaangażowanie pracowników całej organizacji, wdrażanie podejścia opartego na ciągłym doskonaleniu oraz zapobieganiu wadom zamiast ich wykrywaniu, co stanowi fundament współczesnego planowania jakości produktów i procesów opartego na systematycznym nadzorowaniu procesów produkcyjnych i nieustannym ich doskonaleniu [39].

W latach powojennych (po 50 roku XX w.) William Edwards Deming sformułował systematyczne podejście do planowania jakości produktów i procesów poprzez opracowanie koncepcji cyklu PDCA (Plan–Do–Check–Act), w którym faza „Plan” została po raz pierwszy zdefiniowana jako świadome projektowanie obejmujące szczegółowe określenie specyfikacji produktu i procesu jeszcze przed rozpoczęciem produkcji. Koncepcja ta opiera się na założeniu, że punkt wyjścia dla planowania działań pro-jakościowych powinno stanowić precyzyjne określenie wymagań – zarówno technicznych, jak i funkcjonalnych – które produkt i proces jego wytwarzania muszą spełniać. Deming postulował odejście od działań intuicyjnych na rzecz metodycznego planowania jakości opartego na danych i standaryzacji. Cykl PDCA składa się z czterech etapów: planowania, realizacji, sprawdzania oraz działania, a podjęcie kolejnych ich iteracji pozwala na ciągłe doskonalenie procesów i utrzymanie wysokiej jakości produktów [40].

Rozwijając tę ideę, Joseph Moses Juran opracował tzw. trylogię jakości, obejmującą trzy wzajemnie powiązane obszary: planowanie, kontrolę i doskonalenie jakości. Juran jako pierwszy wyraźnie podkreślał strategiczną rolę planowania jakości, definiując je jako „proces projektowania produktów i procesów wymaganych do spełnienia potrzeb klientów”.

Wprowadził również rozróżnienie na klientów zewnętrznych i wewnętrznych, co zrewolucjonizowało podejście do planowania jakości produktów poprzez konieczność identyfikacji i uwzględnienia oczekiwań wszystkich interesariuszy już na etapie projektowania produktów [41- 42].

Teoretyczne podstawy planowania jakości, rozwijane przez Williama Edwardsa Deminga i Josepha Mosesa Jurana, zostały usystematyzowane przez Armanda Vallina Feigenbauma w publikacji *Total Quality Control* z 1961 roku. Feigenbaum jako pierwszy wskazał planowanie jakości jako kluczowy element kompleksowego podejścia TQC (*Total Quality Control*), podkreślając konieczność rozpoczęcia tego procesu już na etapie projektowania produktu. Przypisał mu także wymiar ekonomiczny, włączając planowanie jakości produktu i procesu do modelu kosztów jakości, jako kategorię kosztów prewencji — obok kosztów kontroli oraz kosztów błędów — co nadało mu wyraźne uzasadnienie biznesowe. Feigenbaum definiował całkowitą kontrolę jakości jako skuteczny system integrujący rozwój, utrzymanie i poprawę jakości w ramach całej organizacji, umożliwiający produkcję i świadczenie usług na uzasadnionym ekonomicznie poziomie, który zapewnia pełne zadowolenie klienta. Podkreślał również, że jakość produktu i procesu to nie tylko zadanie działu kontroli jakości w danym przedsiębiorstwie, lecz odpowiedzialność wszystkich uczestników procesu produkcyjnego i zarządzania [43].

Równolegle do kształtowania się podejścia do jakości w procesach produkcyjnych rozwijała się koncepcja inżynierii współbieżnej (*Concurrent Engineering*), która wniosła przełom w projektowaniu jakości produktu poprzez jednoczesne, skoordynowane projektowanie produktu i procesu jego wytwarzania. Jej podstawowym założeniem jest praca interdyscyplinarnego zespołu – obejmującego konstruktorów, technologów, specjalistów ds. jakości, logistyki czy zakupów – który wspólnie odpowiada za spójność całego rozwiązania. Kluczowe znaczenie ma tu równoległe uwzględnianie wymagań klienta, możliwości produkcyjnych, kosztów i czasu realizacji. W praktyce koncepcja ta opiera się na zasadzie „projektuj z myślą o wytwarzaniu” (*Design for Manufacturing*), integracji analizy ryzyka już na etapie koncepcji oraz systematycznym korzystaniu z informacji zwrotnej. Dzięki temu możliwe staje się skrócenie cyklu rozwoju, zmniejszenie liczby późnych zmian, ograniczenie kosztów oraz podniesienie jakości i niezawodności końcowego produktu [44].

Koncepcje teoretyczne opracowane przez Deminga, Jurana, Feigenbauma i Crosby’ego zostały zaadaptowane i rozwinięte przez japońskich menedżerów w ramach tzw. podejścia CWQC (*Company Wide Quality Control*), które dało początek nowoczesnej filozofii TQM (*Total Quality Management*). Głównym impulsem tej transformacji była potrzeba dostosowania zachodnich teorii do specyfiki japońskiej kultury organizacyjnej oraz do wyzwań odbudowującego się po II Wojnie Światowej przemysłu — skupionego na poprawie konkurencyjności, niezawodności i efektywności [45].

Szczególne doświadczenie w tym względzie dotyczy fabryki Toyoty, gdzie uzyskano przekształcenie ogólnych założeń TQC w praktyczne, zintegrowane podejście do jakości, które

nazwano Toyota Production System (TPS). Podejście to traktuje planowanie jakości jako proces obejmujący cały cykl życia produktu — od koncepcji, przez projektowanie, produkcję i montaż, aż po użytkowanie i serwis posprzedażny. Pozwoliło to na planowanie jakości, które nie kończy się na etapie projektowania produktu, lecz jest procesem ciągłym, uwzględniającym interakcje produktu z jego otoczeniem technologicznym, procesowym i rynkowym [46].

Istotnym elementem tego podejścia jest monitorowanie jakości produktu podczas jego eksploatacji. Na podstawie zbieranych danych eksploatacyjnych i informacji zwrotnych od użytkowników identyfikuje się potencjalne wady i podejmuje działania doskonalące. Przykładowo dotyczy to modyfikacji kolejnych wariantów produktu czy usprawnienia procesów serwisowych i wsparcia klienta. Takie działania wpisują się w obowiązujące kryteria nadzoru jakości produktów, które podkreślają konieczność ciągłego doskonalenia opartego na analizie rzeczywistych danych pochodzących z fazy użytkowania produktów. Tym samym nowoczesne inżynierskie podejście do planowania jakości jest ściśle powiązane z pełnym cyklem życia produktu i dążeniem do stałego podnoszenia jego wartości dla klienta [47].

Kluczowe innowacje wykreowane w fabryce Toyoty w zakresie planowania jakości produktu i procesu obejmowały:

- wprowadzenie metody Jidoka, możliwości natychmiastowego zatrzymania procesu produkcyjnego w przypadku wykrycia problemu. Maszyny były wyposażane w mechanizmy pozwalające na szybkie przerwanie pracy przy pojawieniu się niezgodności, co zapobiegało dalszemu przetwarzaniu wadliwych produktów [48].
- koncepcję Poka-Yoke, polegającą na projektowaniu stanowisk pracy i procesów produkcyjnych tak, aby uniemożliwić popełnienie błędu. Podejście umożliwia wykrywanie i eliminację problemów jakościowych już na etapie ich powstawania, co oznaczało przejście od reaktywnej do prewencyjnej strategii w zakresie planowania jakości [49].

Ewolucja filozofii TQC (Total Quality Control) w kierunku TQM (Total Quality Management) miała kluczowe znaczenie, ponieważ po raz pierwszy połączono planowanie jakości z całościowym podejściem do funkcjonowania organizacji. Koncepcja ta oznaczała odejście od modelu, w którym odpowiedzialność za jakość produktu spoczywała wyłącznie na działach produkcji i kontroli funkcjonujących w przedsiębiorstwach, na rzecz włączenia w utrzymanie i doskonalenie jakości produktów wszystkich obszarów działalności przedsiębiorstwa — od procesów technicznych, przez wsparcie administracyjne, po relacje z dostawcami i klientami. TQM objęło wszystkich uczestników organizacji, od najwyższego kierownictwa po operatorów maszyn, czyniąc planowanie jakości produktu wspólnym zadaniem ukierunkowanym na spełnianie potrzeb klienta i ciągłe doskonalenie [50- 51].

Praktyczne zastosowanie koncepcji Kaoru Ishikawy, zwłaszcza w zakresie systemowego podejścia do jakości i zaangażowania wszystkich członków organizacji, znalazło swój wyraz w formalizacji systemów zarządzania jakością. Ważnym krokiem było opublikowanie w 1979 roku brytyjskiego standardu BS 5750 (Specification for Quality Systems), który po raz pierwszy ujednolicił wymagania dotyczące organizacyjnego podejścia do zapewnienia jakości. Standard

BS 5750 stał się bezpośrednią podstawą dla opracowania międzynarodowych norm ISO serii 9000, które ustanowiły ramy dla implementacji i nadzoru systemów zapewniania jakości w przedsiębiorstwach na całym świecie pod koniec lat 80 XX wieku [52].

W obszarze planowania jakości na etapie projektowania produktu, w 1972 roku Yoji Akao opracował metodę Quality Function Deployment (QFD). QFD stanowi usystematyzowane podejście do transformacji wymagań klientów na konkretne parametry techniczne wyrobu, posługując się między innymi matrycami powiązań, z których najbardziej znaną jest tzw. „dom jakości”. Metoda QFD stała się pierwszym formalnym stosowanym podejściem umożliwiającym projektowanie produktów zgodnie z oczekiwaniami klientów, co przyczynia się do znaczącego ograniczenia ryzyka rozbieżności pomiędzy właściwościami wyrobu a potrzebami rynku [53- 54].

Metodologia QFD została uzupełniona przez innowacje Gen'ichiego Taguchiego, który w latach 70. XX wieku opracował podejście *Design of Experiments* oraz wprowadził koncepcję funkcji strat jakości. Taguchi zwracał uwagę, że każde odchylenie od wartości docelowej — nawet mieszczące się w granicach tolerancji — może prowadzić do obniżenia niezawodności, pogorszenia działania wyrobu lub wzrostu kosztów użytkowania. Funkcja strat jakości (*quality loss function*) matematycznie opisuje, w jaki sposób odchylenia od wartości optymalnej przekładają się na straty ponoszone przez użytkownika, producenta lub środowisko. Dodatkowo zostało wprowadzone pojęcie „odporności projektowej” — czyli takiego projektowania produktu i procesu, które minimalizuje wpływ zmiennych zewnętrznych (np. temperatury, drgań, starzenia materiałów) na funkcjonowanie wyrobu, zapewniając stabilność i przewidywalność działania w różnych warunkach jego użytkowania [55- 56].

W przemyśle motoryzacyjnym lata 70. i 80. XX wieku ukształtowały się wymagania dotyczące procesu zatwierdzania części produkcyjnych stosowane przez koncerny Forda i General Motors, które stały się podstawą dla późniejszego opracowania standardu PPAP (Production Part Approval Process). Jednocześnie w 1987 roku publikacja pierwszej wersji norm ISO serii 9000 ustanowiła globalne wymagania dotyczące systematycznego planowania jakości w organizacjach, obejmujące dokumentowanie procesów planowania, określanie odpowiedzialności za jakość oraz ustanawianie procedur korygujących. Normy te po raz pierwszy ujednoliciły międzynarodowe podejście do planowania jakości, tworząc wspólne nazewnictwo i metodologię niezależnie od branży czy lokalizacji geograficznej przedsiębiorstw [57- 58].

Podejście do jakości zostało wzmocnione koncepcją "zero defektów" Philip B. Crosby'ego, który argumentował, że koszty zapobiegania wadom są zawsze niższe niż koszty ich naprawiania, wzmacniając tym samym znaczenie prewencyjnego podejścia do planowania jakości. Podejście Crosby'ego koreluje z planowaniem jakości poprzez wprowadzenie ekonomicznego uzasadnienia dla planowania działań prewencyjnych na etapie projektowania, co oznaczało fundamentalne przesunięcie środków finansowych z etapów kontroli i napraw w kierunku planowania jakości i zapobiegania wadom [59, 60].

Z końcem lat 80. XX wieku rozpoczęcie przez amerykańską „Wielką Trójkę” (Ford, General Motors, Chrysler) wdrażania ujednoliconych wymagań wobec dostawców w zakresie kontroli ich procesów produkcyjnych, stanowiło kolejny krok w zakresie projakościowych działań związanych z planowaniem jakości. Działanie to rozszerzyło planowanie jakości na cały łańcuch dostaw, zobowiązując dostawców do wykazania zdolności do systematycznego stosowania jednolitych standardów jej utrzymania. Ta harmonizacja międzynarodowych praktyk jednocześnie ujawniła potrzebę bardziej specjalistycznego podejścia dostosowanego do specyfiki branży motoryzacyjnej, co również wspierało potrzebę opracowywania branżowych standardów jakości, takich jak ISO/TS 16949 dedykowanego podmiotom gospodarczym w łańcuchu dostaw dla przemysłu motoryzacyjnego. Rozwój branżowych standardów jakości oznaczał przejście od planowania jakości opartego na uniwersalnych zasadach do specjalistycznych metodologii uwzględniających wyzwania różnych sektorów przemysłu, co współcześnie umożliwia przedsiębiorstwom dostosowanie procesów planowania jakości do specyficznych wymagań branżowych [61-62].

Globalizacja standardów jakości zapoczątkowana przez „Wielką Trójkę” znalazła kontynuację w latach 90. XX wieku wraz z rozwojem kompleksowych metodologii planowania jakości dedykowanych przemysłowi motoryzacyjnemu oraz równolegle rozwijającą się cyfryzacją procesów wytwarzania (wdrażanie systemów CAD/CAM, komputeryzacja dokumentacji projektowej produktu i procesu produkcyjnego, rozwój baz danych do elektronicznego zarządzania planami jakości). W 1994 roku AIAG (Automotive Industry Action Group) opracował metodologię APQP (Advanced Product Quality Planning), która integrowała pięciofazowy model planowania jakości z zestawem podstawowych dedykowanych kluczowych narzędzi, określanych jako „Core Tools” obejmujący metodyki [63-65, 3S- 5S, 8S- 9S]:

1. APQP (Advanced Product Quality Planning),
2. FMEA (Failure Mode and Effects Analysis),
3. MSA (Measurement System Analysis),
4. SPC (Statistical Process Control),
5. PPAP (Production Part Approval Process).

Metodologia APQP po raz pierwszy połączyła planowanie jakości z zarządzaniem projektem, tworząc ustrukturalizowane podejście, gdzie każda faza rozwoju produktu posiada zdefiniowane cele jakościowe, kryteria wyjścia oraz wymagane dokumenty. Podejście to zrewolucjonizowało proces planowania jakości produktu i procesu poprzez przejście od działań incydentalnych do systematycznego, powtarzalnego procesu opartego na wykorzystaniu standardowych inżynierskich instrumentów jakościowych, co znacząco obniżyło ryzyko popełnienia błędów na etapie projektowania produktu i procesu oraz skróciło czas wprowadzania produktów na rynek. Metodologia APQP wprowadziła również systematyczne podejście do planowania jakości produktu w łańcuchu dostaw poprzez integrację z koncepcją Supply Chain Management (SCM). Planowanie jakości, które w końcu lat 80. zostaje rozszerzone na cały łańcuch dostaw, w metodologii APQP (1994) zostało dodatkowo

usystematyzowane poprzez wymaganie aktywnego uczestnictwa dostawców już na etapie rozwoju produktu. W tym kontekście koncepcję Supply Chain Management (SCM) należy postrzegać jako koordynację wymagań jakościowych, standardów kontroli i procedur weryfikacji realizowaną pomiędzy wszystkimi ogniwami łańcucha dostaw, co umożliwia proaktywne zarządzanie ryzykiem jakościowym w całym procesie wytwarzania produktu [67-69].

Równolegle rozwijały się krajowe standardy jakościowe w branży motoryzacyjnej: w Stanach Zjednoczonych był to QS-9000 (Quality System Requirements), w Niemczech VDA 6.1 (Verband der Automobilindustrie – Qualitätsmanagementsysteme), we Francji EAQF (Évaluation Aptitude Qualité Fournisseur), a we Włoszech AVSQ (Assicurazione della Qualità Fornitori). Każdy z tych standardów odzwierciedlał odmienne podejście do planowania jakości, wynikające z lokalnej kultury przemysłowej. VDA 6.1 kładł nacisk na szczegółową dokumentację i formalizm procedur planowania, EAQF koncentrował się na weryfikacji zdolności jakościowej dostawców, a QS-9000 integrował planowanie jakości z podejściem do ciągłego doskonalenia procesów [70].

Ta różnorodność podejść wymusiła na globalnych dostawcach opracowanie jednolitego podejścia do planowania jakości, przystosowanego do spełniania jednocześnie różnych wymagań klientów w zależności od regionu świata. Chociaż różnorodność standardów stanowiła istotne wyzwanie w działalności operacyjnej organizacji, przyczyniła się również do rozwoju nowych metodologii planowania, integrujących najlepsze stosowane praktyki. W efekcie przedsiębiorstwa rozwijały swoje kluczowe kompetencje w realizacji projektów międzynarodowych, złożonych kulturowo i proceduralnie.

XXI wiek charakteryzuje się dwoma kluczowymi trendami transformacyjnymi w planowaniu jakości produktów i procesów: harmonizacją standardów oraz integracją technologii cyfrowych. Harmonizacja standardów jakościowych dla branży motoryzacyjnej rozpoczęła się od opracowania specyfikacji ISO/TS 16949:2002 (Technical Specification – Systemy zarządzania jakością – Szczególne wymagania dotyczące zastosowania ISO 9001:2000 w przemyśle motoryzacyjnym i organizacjach produkujących części zamienne). Był to pierwszy globalny standard dla branży motoryzacyjnej, który zharmonizował różnorodne, regionalne wymagania, umożliwiając dostawcom stosowanie jednolitych procesów w tym planowania jakości niezależnie od lokalizacji klienta.

Na bazie tego standardu w 2016 roku opracowano normę IATF 16949 (International Automotive Task Force – Systemy zarządzania jakością dla przemysłu motoryzacyjnego), która wzmocniła wymagania dotyczące zarządzania ryzykiem w łańcuchu dostaw. Wprowadziła obowiązkowe analizy ryzyka, opracowywanie planów awaryjnych oraz monitoring kluczowych wskaźników jakościowych dla dostawców. Dzięki harmonizacji standardów systemowych wymagań jakościowych osiągnięto wymierne korzyści operacyjne, takie jak eliminacja konieczności utrzymywania odrębnych systemów zarządzania jakością i związanej z nimi dokumentacji - różnych dla poszczególnych regionów świata, skrócenie czasu audytów

dostawców oraz możliwość transferu dostawców pomiędzy projektami różnych koncernów bez konieczności ponownej certyfikacji procesów planowania jakości [1S- 2S].

Równolegle z harmonizacją standardów w XXI wieku zachodziła dynamiczna ewolucja metod planowania jakości produktów ukształtowana przez koncepcję Przemysłu 4.0. Tradycyjne podejście, oparte na dokumentacji papierowej, okresowych kontrolach oraz reaktywnym rozwiązywaniu problemów, zostały uzupełnione nowoczesnymi cyfrowymi metodologiami, które wykorzystują pozyskiwanie danych w czasie rzeczywistym oraz zaawansowaną analitykę predykcyjną [72- 73].

Współczesne inżynierskie planowanie jakości produktu integruje technologie takie jak Internet Rzeczy (IoT), umożliwiające stały monitoring parametrów procesów wykorzystując sieć czujników; cyfrowe bliźniaki — wirtualne modele procesów i produktów, które pozwalają na symulację i ocenę różnych scenariuszy jakościowych przed ich wdrożeniem do praktyki przemysłowej; analitykę danych, wykorzystującą algorytmy do przetwarzania informacji historycznych w celu identyfikacji wzorców i potencjalnych zagrożeń; oraz sztuczną inteligencję i uczenie maszynowe, które optymalizują parametry procesów produkcyjnych i przewidują ryzyko powstawania niezgodności [74- 75].

Zastosowanie powyższych technologii pozwala przejść od reaktywnego planowania jakości produktu do podejścia predykcyjnego, w którym potencjalne problemy mogą być wykrywane z czasowym wyprzedzeniem. Efektem czego jest znacząca redukcja kosztów związanych z brakiem jakości, skrócenie czasu reakcji na wstępujące problemy jakościowe z dni do godzin oraz zwiększenie trafności prognoz jakościowych. Tym samym współczesne planowanie jakości produktu przyjmuje charakter hybrydowy, łącząc sprawdzone, klasyczne metody i podejścia do jakości z nowoczesnymi możliwościami technologii cyfrowych, co przekłada się na wyższy poziom kontroli i efektywności operacyjnej w całym łańcuchu tworzenia wartości produktu [76- 77].

Współczesne planowanie jakości cechuje ścisła integracja aspektów dotyczących jakości produktu i procesu jego wytwarzania na wszystkich etapach cyklu życia produktu — od koncepcji, przez projektowanie i produkcję, aż po użytkowanie. Tradycyjne podejścia zostały zastąpione metodologiami, które jednocześnie definiują cechy jakościowe produktu oraz parametry procesów technologicznych, wraz z metodami ich monitorowania i kontroli — można stwierdzić, iż obejmują je w sposób holistyczny. Realizacja tego możliwa jest w oparciu o nowoczesne cyfrowe platformy danych, które w czasie rzeczywistym łączą dane produktowe (np. funkcje, tolerancje, wymagania) z danymi procesowymi (np. parametry technologiczne, zdolność i stabilność procesu), pozwalając na przykład na dynamiczne dostosowywanie wymagań określonych w planach jakości do aktualnych warunków produkcyjnych. W tym kontekście cyfryzacja inżynierskiego instrumentarium jakościowego odgrywa kluczową rolę — elektroniczne arkusze FMEA umożliwiają automatyczne obliczanie wskaźników ryzyka i integrację z bazami danych niezgodności produktu, a cyfrowe karty SPC umożliwiają monitorowanie parametrów procesów z alertami w czasie rzeczywistym oraz automatyczną

aktualizację granic kontrolnych. Dodatkowo *cloud computing* pozwala na zdalne przechowywanie, udostępnianie i synchronizację danych jakościowych dotyczących globalnych łańcuchów dostaw za pośrednictwem internetowych platform chmurowych. Zastosowanie powyższego pozwala, aby zakłady produkcyjne łańcucha dostaw w czasie rzeczywistym posiadały dostęp do aktualnych danych i informacji, co ułatwia szybkie i trafne podejmowanie decyzji, koordynację działań i zapewnia spójność procesów jakościowych w rozproszonych środowiskach produkcyjnych [78- 79].

Integracja tradycyjnych metod planowania jakości z technologiami cyfrowymi i sztuczną inteligencją prowadzi do rozwoju zaawansowanych systemów, które wykorzystują zarówno dane historyczne, jak i w czasie rzeczywistym, umożliwiając proaktywne zarządzanie jakością. Zastosowanie algorytmów uczenia maszynowego i analityka predykcyjna systemów umożliwia przewidywanie potencjalnych problemów zanim one nastąpią, automatycznie dostosowywać częstotliwość kontroli w procesie produkcyjnym do aktualnej stabilności procesów oraz rekomendować optymalne metody kontroli dla nowych produktów. Wprowadzane są nowe wskaźniki skuteczności planowania jakości, takie jak wskaźnik dotyczące liczby zagrożeń, które udało się wykryć zanim się pojawiły oraz wskaźnik oceniający, jak dobrze system nadzoru potrafi dostosować się do zmian w procesie produkcyjnym. To podejście umożliwia bardziej elastyczne i efektywne kształtowanie jakości produktu, jednocześnie obniżając koszty i zasoby potrzebne do utrzymania systemu planowania i nadzoru jakości, usprawniając szybkie reagowanie na niezgodności oraz wspierając ciągłe doskonalenie procesów produkcyjnych [80- 81].

Współczesne podejście do planowania jakości produktu determinowane przez metodologię APQP i transformację cyfrową stanowi kontynuację procesu globalizacji standardów jakości, która charakteryzuje się przejściem od rozproszonych, niespójnych i lokalnych praktyk do zintegrowanych, globalnych metodologii planowania jakości produktu. Ta zmiana wiąże się z istotną transformacją struktury organizacyjnej przedsiębiorstw – zamiast wyspecjalizowanych działów w przedsiębiorstwach zajmujących się jedynie wybranymi aspektami jakości, powstają interdyscyplinarne zespoły odpowiedzialne za analizy dotyczące całości cyklu życia produkowanych produktu. Obejmuje to fazy: od definiowania wymagań klienta, przez projektowanie produktu i procesu, aż do walidacji i uruchomienia produkcji seryjnej oraz reagowania na zgłaszane reklamacje. Kluczowym elementem jest ścisłe powiązanie planowania jakości z powszechnie stosowanym w praktyce przemysłowej podejściem do zarządzania projektem poprzez jednoznaczne określenie dla każdego etapu projektowania produktu i procesu produkcyjnego celów jakościowych, przypisanych odpowiednich ról pracownikom i mierzalnych kryteriów sukcesu — takich jak zgodność z wymaganiami klienta, osiągnięcie oczekiwanych poziomów zdolności procesu, brak niezgodności podczas uruchomienia produkcji oraz dotrzymanie kluczowych terminów realizacji procesu wdrożenia i dostawy do klienta. Takie podejście pozwala przedsiębiorstwom na efektywne wdrażanie spójnych, powtarzalnych standardów planowania jakości produktów i procesów produkcyjnych [81- 82].

Równolegle nastąpiła ewolucja podejścia do planowania jakości produktów dotycząca odejścia od działań opartych na wiedzy indywidualnych ekspertów i niesformalizowanej dokumentacji technicznej (tzw. dokumentów tworzonych jednorazowo i rzadko aktualizowanych) do systematycznych, zdefiniowanych metod strukturalnych w tym zakresie. Najlepszym przykładem tej transformacji jest pięciofazowy model zwarty w podręczniku APQP, który po raz pierwszy w historii przemysłu jednoznacznie określił cele, zadania i oczekiwane rezultaty dla każdego etapu rozwoju produktu i procesu. Wprowadzenie tak uporządkowanego podejścia umożliwia przedsiębiorstwom uzyskanie spójnych i przewidywalnych efektów planowania jakości produktu, rozumianych jako zdolność do konsekwentnego osiągania założonych celów jakościowych, przy ograniczeniu liczby nieplanowanych modyfikacji produktów, opóźnień oraz kosztownych iteracji na etapie projektowania. Zamiast opierać dbałość o jakość produktu na działaniach korygujących, możliwe stało się projektowanie produktów i procesów zgodnie z ustalonymi wymaganiami już od pierwszego podejścia tzw. *first time right*. Takie podejście sprzyja również dotrzymaniu pierwotnie założonego harmonogramu projektu planowania i rozwoju produktu i procesu przy zadeklarowanych zasobach – co stanowi jedno z kluczowych kryteriów sukcesu danego projektu wdrożeniowego produktu. Korzyści te mają szczególne znaczenie w przypadku złożonych projektów produktowych i procesowych, które wymagają ścisłej współpracy wielu osób i podmiotów o wielu specjalizacjach technicznych oraz skoordynowanego działania różnych funkcji organizacyjnych w tym obejmujących łańcuchy dostaw [83].

Podsumowując dotychczasowy przegląd, rozwój podejścia do planowania jakości produktu i procesu można sprowadzić do przejścia od nieformalnych, intuicyjnych działań ekspertów do złożonych, systemowych i zintegrowanych metod, które są wspierane szerokim spektrum inżynierskiego instrumentarium jakościowego i zaawansowanymi technologiami cyfrowymi. Ewolucja ta obejmuje nie tylko sam zakres stosowanych instrumentów i procedur, ale także znaczne zmiany w procesie planowania jakości produktu i procesu w strukturze organizacyjnej oraz sposobie formułowania i realizacji celów dla poszczególnych projektów. W celu usystematyzowania dotychczasowej transformacji w tym zakresie w tabeli 2.1.1 przedstawiono pięć kluczowych wymiarów, które ilustrują przejście od tradycyjnych praktyk w zakresie planowania jakości produktów do nowoczesnych rozwiązań stosowanych w przemyśle, zwłaszcza motoryzacyjnym. Analiza przyjętych wymiarów wskazuje, jak zmieniały się priorytety, zakres odpowiedzialności i mechanizmy działania dotyczące planowania jakości produktu na przestrzeni analizowanego czasu, dostarczając podstawy do dalszych rozważań dotyczących bieżących wyzwań i kierunków rozwoju planowania jakości produktów i procesów produkcyjnych, z uwzględnieniem specyfiki branży motoryzacyjnej.

Tabela 2.1.1. Kluczowe kierunki ewolucji podejścia do planowania jakości w ujęciu historycznym (opracowanie własne na podstawie [84- 86])

KIERUNKI ROZWOJU	ERA KONTROLI JAKOŚCI (Quality Control)	ERA STEROWANIA JAKOŚCIĄ (Statistical Process Control)	ERA ZAPEWNIANIA JAKOŚCI (Quality Assurance)	ERA ZARZĄDZANIA JAKOŚCIĄ (Total Quality Management)
Od reaktywnego do proaktywnego podejścia	- Inspekcja końcowa produktu - Sortowanie wadliwych komponentów - Wykrywanie niezgodności	- SPC (Statistical Process Control) - Karty kontrolne Shewharta - Kontrola zmienności	- FMEA/DFMEA, QFD - Design for Quality (projektowanie dla jakości) - Zapobieganie błędom	- Predictive Quality (AI/ML) - Big Data Analytics - Przewidywanie problemów przed wystąpieniem
Od działu jakości do odpowiedzialności interdyscyplinarnej	- Izolowany dział kontroli jakości - Ograniczona współpraca między działami (funkcyjne silosy decyzyjne) - Inspekcja przez ekspertów	- Zespoły interdyscyplinarne - Quality Circles (Koła Jakości) - Współpraca pomiędzy różnymi działami	- Inżynieria współbieżna - Zespoły interdyscyplinarne - Zintegrowane procesy planowania jakości produktu i procesu	- Zarządzanie jakością na poziomie przedsiębiorstwa - Globalne zespoły jakości - Platformy do wspólnego planowania jakości online
Od kontroli końcowej do wbudowanej jakości	- Inspekcja 100% - Wykrywanie wad - Kontrola produktu gotowego	- Kontrola w trakcie procesu - Statystyczne próbkowanie - Monitoring parametrów procesu i jakości produktu	- Poka-Yoke, Jidoka - Zasada jakości wbudowanej w proces (Built-in Quality) - Projektowanie ukierunkowane na jakość	- Inteligentne systemy jakości - IoT Quality Monitoring - Adaptacyjne systemy jakości
Od podejścia lokalnego do globalnego zarządzania	- Lokalne standardy - Korporacyjne praktyki - Izolowane systemy	- Krajowe standardy (MIL-STD) - Branżowe wytyczne - Sektorowa standaryzacja	- Norma ISO 9001 – wymagania dla systemów zarządzania jakością - Międzynarodowa harmonizacja - Globalne certyfikacje	- Globalne platformy jakości - IATF 16949, Cloud QMS - Jednolite systemy planowania dla wszystkich lokalizacji
Od intuicyjnego działania do podejmowania decyzji opartych na danych	- Decyzje oparte na doświadczeniu - Metoda prób i błędów - Subiektywna ocena	- Dane statystyczne - Analiza trendów - Obiektywne pomiary	- Six Sigma, DMAIC - Design of Experiments - Systematyczna analiza	- Big Data Analytics (analityka dużych zbiorów danych) - AI/ML Quality Prediction - Real-time Intelligence (analityka w czasie rzeczywistym)

Analiza pięciu wymiarów transformacji planowania jakości produktu dla branży motoryzacyjnej, przedstawionych w tabeli 2.1.1, pozwala wskazać nie tylko ich wzajemne powiązania, ale także wynikający z nich efekt synergii dotyczący równoczesnego rozwoju wszystkich kluczowych obszarów dla jakości – takich jak standaryzacja procesów produkcyjnych, cyfryzacja, reorganizacja odpowiedzialności, rozwój kompetencji oraz integracja systemów kontroli – co przynosi większe korzyści, niż suma niezależnych usprawnień podejmowanych w każdym z obszarze z osobna.

W praktyce przemysłowej oznacza to, że postęp w jednym z wymiarów przedstawionych w tabeli 2.1.1 wspiera i przyspiesza rozwój pozostałych, np. wdrożenie narzędzi cyfrowych ułatwia standaryzację procesów i lepszą współpracę zespołów interdyscyplinarnych, a jednoznaczny podział odpowiedzialności usprawnia wdrażanie nowych rozwiązań technologicznych. W wyniku tych powiązań przedsiębiorstwa branży motoryzacyjnej mogą skuteczniej i szybciej podnosić jakość produktów oraz lepiej reagować na niezgodności w procesach produkcyjnych.

W tabeli 2.1.2 zaprezentowano rozwój podejścia do planowania jakości w poszczególnych erach w tym określono główne czynniki napędzające tę ewolucję. Zestawienie to stanowi uzupełnienie analizy dotychczasowego inżynierskiego instrumentarium jakościowego i stosowanych podejść i metodologii jakościowych o kontekst organizacyjny oraz uwarunkowania środowiskowe, które ukształtowały transformację podejścia do planowania jakości produktu w kolejnych etapach jej rozwoju.

Tabela 2.1.2. Kontekst rozwoju i kluczowe czynniki ewolucji procesu planowania jakości (opracowanie własne na podstawie [87- 88])

KONTEKST ROZWOJU	ERA KONTROLI JAKOŚCI	ERA STEROWANIA JAKOŚCIĄ	ERA ZAPEWNIANIA JAKOŚCI	ERA ZARZĄDZANIA JAKOŚCIĄ
	(Quality Control)	(Statistical Process Control)	(Quality Assurance)	(Total Quality Management)
Główne wyzwania biznesowe	Masowa produkcja przemysłowa, standaryzacja wyrobów, obniżenie kosztów wadliwych produktów	Konkurencja międzynarodowa, wyższe wymagania klientów, bardziej skomplikowane produkty	Szybsze wprowadzanie nowych produktów, zróżnicowane potrzeby klientów, globalne rynki	Indywidualne zamówienia klientów, ochrona środowiska, szybka reakcja na zmiany rynku
Kluczowe czynniki napędowe rozwoju planowania jakości	Rozwój fabryk, wojny światowe, potrzeba zwiększenia wydajności produkcji	Odbudowa po wojnie, wymagania wojskowe, rozwój matematyki, konkurencja z Japonią	Handel międzynarodowy, Unia Europejska, komputery, normy ISO	Internet, sztuczna inteligencja, czujniki w maszynach, automatyzacja przedsiębiorstw
Kluczowe bariery do przełamania w planowaniu jakości	Brak ujednoliconych metod, wysokie koszty kontroli, sprawdzanie tylko gotowych produktów	Nieregularne procesy produkcji, brak narzędzi do analizy, izolowane działy jakości	Różne systemy w różnych działach, brak współpracy między funkcjami, różne standardy w krajach	Dane rozproszone w różnych systemach, brak ich wzajemnego powiązania, złożone łańcuchy dostaw oraz ryzyko ataków cybernetycznych
Przełomowe innowacje organizacyjne w planowaniu jakości	Utworzenie działów kontroli jakości, pisemne procedury, dokumentowanie standardów	Zespoły do rozwiązywania problemów, koła jakości, szkolenia pracowników, kontrole wewnętrzne	Współpraca między działami, certyfikaty systemów, porównywanie z najlepszymi, kontrole u dostawców	Cyfrowe systemy jakości, platformy do współpracy online, przewidywanie problemów, automatyczne systemy kontroli
Wpływ na ewolucję metodologii planowania jakości	Planowanie skupione na kontroli gotowych produktów i usuwaniu wadliwych	Planowanie zapobiegawcze oparte na analizie danych i kontroli procesów	Planowanie obejmujące całą organizację i współpracę z dostawcami	Planowanie przewidujące problemy przy użyciu sztucznej inteligencji i danych w czasie rzeczywistym

Analiza czynników ewolucji planowania jakości, przedstawiona w tabeli 2.1.2, wskazuje, że kolejne etapy rozwoju charakteryzuje stopniowe poszerzanie perspektywy – od doskonalenia procesów produkcyjnych, przez integrację interdyscyplinarnych kompetencji, aż po uwzględnianie pełnego cyklu życia wyrobu obejmującego wszystkie fazy – od projektowania, przez wytwarzanie, eksploatację i serwis, aż po regenerację, ponowne wykorzystanie lub recykling. Włączenie tych etapów do planowania jakości oznacza, że wymagania techniczne, kryteria akceptacji oraz procedury kontroli muszą być spójne zarówno dla nowych produktów, jak i dla komponentów regenerowanych czy materiałów pochodzących z odzysku. Trend ten stanowi fundament dla kierunków rozwoju inżynierskiego instrumentarium planowania jakości, zestawionych w tabeli 2.1.3, które odpowiadają na rosnące wymagania związane z kompleksowym podejściem do jakości dla całego cyklu życia produktu.

Tabela 2.1.3. Perspektywy rozwoju planowania jakości do 2030 roku (opracowanie własne na podstawie [89- 93])

KIERUNEK ROZWOJU	KLUCZOWE TECHNOLOGIE I KONCEPCJE	POTENCJALNY WPŁYW NA PLANOWANIE JAKOŚCI
Integracja technologii cyfrowych	Integracja sztucznej inteligencji, IoT, blockchain i cyfrowych bliźniaków w jeden ekosystem planowania.	Całościowa wizualizacja pomiarów dotyczących jakości w czasie rzeczywistym, automatyzacja procesów decyzyjnych w planowaniu jakości.
Samoregulujące się systemy planowania jakości	Samodoskonalące się algorytmy, systemy adaptacyjne, automatyczne wykrywanie anomalii w procesach planowania.	Przejęcie od reaktywnego do proaktywnego planowania jakości, minimalizacja potrzeby interwencji specjalistów.
Współpraca człowieka z technologią w planowaniu	Rozszerzona i wirtualna rzeczywistość, systemy wspomagające decyzje, zaawansowana wizualizacja danych jakościowych.	Upowszechnienie narzędzi planowania jakości, wzrost efektywności zespołów oraz intensyfikacja transferu wiedzy.
Zrównoważone planowanie jakości	Systemy śledzenia materiałów, ocena cyklu życia, projektowanie dla obiegu zamkniętego.	Integracja celów jakościowych ze zrównoważonym rozwojem, planowanie jakości z uwzględnieniem pełnego cyklu życia produktu.

Przedstawiona analiza ewolucji podejścia do planowania jakości (tabele 2.1.2–2.1.3) wskazuje na zasadnicze zmiany na przestrzeni czasu ostatniego stulecia. Transformacja od reaktywnego podejścia, w którym działania inżynierskie koncentrowały się na wykrywaniu i usuwaniu problemów po ich wystąpieniu, do podejścia predykcyjnego, opartego na prognozowaniu potencjalnych niezgodności i ich zapobieganiu jeszcze przed pojawieniem się w procesie produkcyjnym, stanowi fundament współczesnych strategii jakościowych w złożonych projektach przemysłowych. Predykcyjne podejście do planowania jakości wykorzystuje dane historyczne, analizy statystyczne, modele ryzyka i narzędzia cyfrowe do identyfikacji obszarów podwyższonego ryzyka oraz wprowadzania działań zapobiegawczych na etapie projektowania i przygotowania produkcji. Kluczowe kamienie milowe ewolucji obejmują wprowadzenie przez Shewharta (1924) metodycznego podejścia do planowania i kontroli procesów, japońską rewolucję jakościową Deminga i Jurana (lata 50.–60. XX wieku), która ustanowiła zasady systemowego zapobiegania problemom jakościowym, oraz opracowanie metodologii APQP (1994), która po raz pierwszy zintegrowała planowanie jakości z zarządzaniem projektem w przemyśle motoryzacyjnym.

Odejście od reaktywnych procedur, polegających na rozwiązywaniu wykrytych już niezgodności, oznacza wdrażanie metod predykcyjnych — wykorzystujących dane historyczne i aktualne, analizy statystyczne oraz narzędzia cyfrowe do przewidywania potencjalnych niezgodności i zapobiegania im jeszcze przed ich wystąpieniem. W praktyce polega to na

wczesnej identyfikacji obszarów ryzyka oraz wdrażaniu działań prewencyjnych – zanim pojawią się rzeczywiste odchylenia od wymagań jakościowych. Pozwala to organizacjom szybciej wykrywać potencjalne słabe punkty w procesie rozwoju lub produkcji produktu, ale także skutecznie minimalizować ryzyko powstania niezgodności, ograniczając straty i poprawiając skuteczność procesu planowania jakości.

W procesie rozwoju produktów, charakterystycznym dla drugiej połowy XX wieku, planowanie jakości miało formę sekwencyjną i traktowane było jako odrębny, zamknięty etap realizowany na początku procesu projektowo-wdrożeniowego produktu. Zadania te wykonywał zazwyczaj wyspecjalizowany dział jakości lub konstrukcyjny. Przyjmowano wówczas liniowy przebieg prac: po zakończeniu etapu planowania przechodzono bezpośrednio do faz wdrożenia i produkcji, bez konieczności weryfikacji wcześniejszych ustaleń. Model ten był skuteczny w warunkach ograniczonej złożoności technologicznej, typowej dla produkcji masowej w latach 60. i 70. XX wieku.

Równolegle do ewolucji procesu planowania jakości ugruntowało się podejście procesowe, znajdujące formalne odzwierciedlenie w wymaganiach norm ISO 9001:2015 i IATF 16949. Kluczowe znaczenie mają tu wymagania dotyczące ciągłego doskonalenia (IATF 16949, pkt, 10.3) oraz zarządzania ryzykiem i szansami (ISO 9001 pkt, 6.1), które jednoznacznie wskazują, że planowanie jakości powinno obejmować cały cykl życia produktu, a nie kończyć się w momencie zatwierdzenia produkcji. W praktyce oznacza to systematyczne analizowanie danych z bieżącej produkcji, wyników testów trwałości, zgłoszeń reklamacyjnych, audytów procesowych oraz wskaźników zdolności (C_p , C_{pk}), a następnie aktualizowanie kluczowych dokumentów dla jakości – takich jak FMEA, plan kontroli, diagramy przepływu czy listy charakterystyk specjalnych – wszędzie tam, gdzie pojawiają się nowe informacje, zmiany konstrukcyjne lub sygnały możliwych niezgodności.

Podsumowując, podejście do planowania jakości przeszło drogę od tradycyjnego podejścia projektowo-wdrożeniowego do ciągłego, adaptacyjnego podejścia opartego na analizie danych, prewencji niezgodności i szybkiej reakcji na zmiany. Ta ewolucja, odzwierciedla wzrost złożoności produktów oraz rosnące wymagania branży motoryzacyjnej, stanowiąc punkt wyjścia do omówienia współczesnego instrumentarium planowania jakości przedstawionego w rozdziale 2.2.

2.2 Współczesne dylematy w podejściu do planowania jakości produktów i procesów produkcyjnych

Produkty mechatroniczne charakteryzują się wysoką złożonością techniczną, wynikającą z integracji elementów mechanicznych, elektronicznych i systemów sterowania w jeden spójny system. Takie rozwiązania wymagają planowania jakości obejmującego cały proces rozwoju produktu, z szczególnym uwzględnieniem różnic w funkcjach, wymaganiach projektowych, czasie i zakresie testów oraz procedurach walidacji poszczególnych komponentów produktów końcowych. Kluczowe staje się analizowanie każdej decyzji projektowej i technologicznej pod kątem jej wpływu na inne elementy systemu, zgodności z wymaganiami jakościowymi oraz ryzyka wystąpienia niezgodności w kolejnych fazach cyklu życia wyrobu [94].

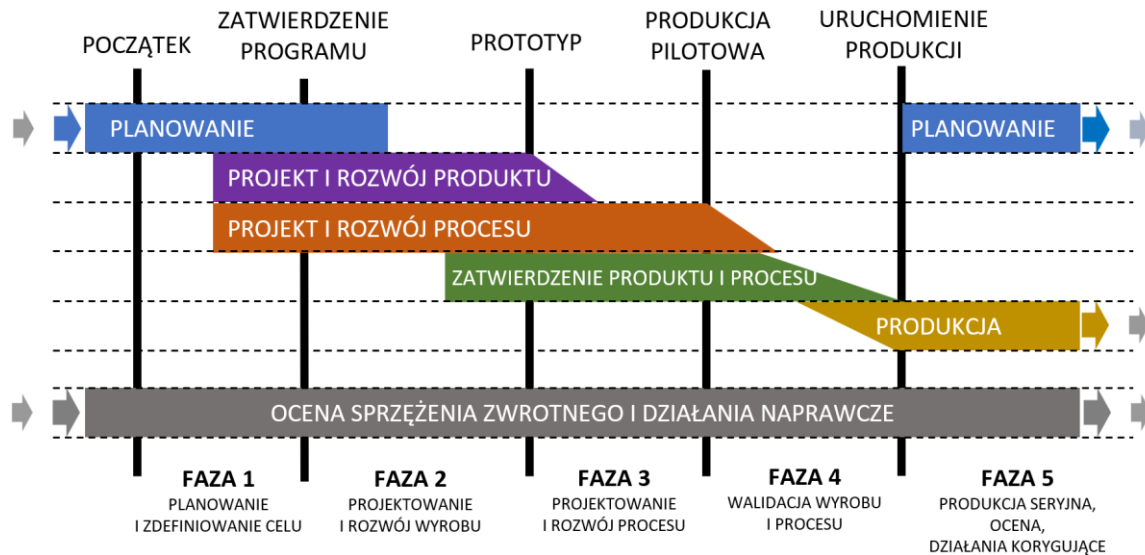
W celu uzyskania odpowiedniego poziomu skuteczności w zakresie sprostania wyzwaniom jakościowym w przemyśle motoryzacyjnym stosuje się trzy kluczowe metodologie dotyczące planowania jakości: Advanced Product Quality Planning (APQP), Failure Mode and Effects Analysis (FMEA) oraz Production Part Approval Process (PPAP). Systemowe ich wykorzystanie w przedsiębiorstwach branży motoryzacyjnej na wszystkich etapach życia produktu, wymagane między innymi przez normę IATF 16949:2016, umożliwia skuteczne zarządzanie ryzykiem, kontrolę zgodności oraz ciągłe doskonalenie zarówno produktu, jak i procesu produkcyjnego [3S- 6S].

Kluczowym ograniczeniem obecnego podejścia do procesu planowania jakości produktu jest uniwersalny charakter instrumentów określonych w obowiązujących metodologiach. APQP, FMEA i PPAP zostały opracowane jako metodologie o szerokim zakresie zastosowania, bez rozróżnienia między produktami konwencjonalnymi a złożonymi, wymagającymi integracji wielu obszarów technicznych. Żadna z tych metodologii nie zawiera procedur dedykowanych specyfice systemów mechatronicznych, co w praktyce oznacza, że produkty o dużej złożoności konstrukcyjnej mogą być traktowane identycznie jak proste, jednofunkcyjne komponenty. Choć sama istota stosowanych instrumentów jakościowych może pozostać niezmienna, kluczowe jest ich odpowiednie dostosowanie do specyfiki produktu, procesów oraz określonych wymagań, co wymaga rozwinięcia metodologii planowania jakości uwzględniających odmienne potrzeby poszczególnych kategorii produktów.

Zaawansowane Planowanie Jakości Produktu (APQP) jest obecnie jednym z kluczowych wymagań w przemyśle motoryzacyjnym. Jego głównym celem jest uzyskanie spójnej struktury działań, która obejmuje cały cykl rozwoju produktu – od planowania, przez projektowanie, aż po produkcję i działania doskonalące. Metodologia ta została opracowana jako odpowiedź na potrzebę uporządkowania procesów jakościowych, ujednolicenia wymagań oraz lepszego zarządzania ryzykiem w globalnych łańcuchach dostaw.

Na rysunku 2.2.1 przedstawiono ogólny model APQP, który ilustruje powiązania pomiędzy głównymi obszarami działań – planowaniem, rozwojem produktu i procesem, ich zatwierdzaniem oraz produkcją – uzupełnionymi przez mechanizmy sprzężenia zwrotnego.

Szczególnie istotne jest wskazanie na przenikania się poszczególnych faz, co kształtuje proces planowania jakości jako iteracyjny i wymaga bieżącej wymiany informacji pomiędzy obszarami projektowymi i produkcyjnymi.



Rysunek 2.2.1. Model APQP – powiązania pomiędzy głównymi fazami planowania jakości (opracowanie własne na podstawie 4S)

Rysunek 2.2.1 przedstawia APQP jako zintegrowany proces, w którym każda faza bezpośrednio oddziałuje na pozostałe. Zamiast sztywnych granic pomiędzy kolejnymi fazami, naturalnie się one przenikają, wymuszając nieustanną wymianę aktualnych informacji i doświadczeń. Takie podejście sprzyja budowaniu przejrzystej komunikacji oraz szybkiego reagowania na pojawiające się wyzwania w rozwoju produktu i procesu.

Tabela 2.2.1. Charakterystyka faz APQP i ich wpływ na planowanie jakości (opracowanie własne na podstawie [4S])

Faza APQP	Charakterystyka	Wpływ na planowanie jakości
Faza 1 – Planowanie i zdefiniowanie celu	Analiza wymagań klienta, określenie zakresu projektu i wstępnych założeń biznesowych.	Wyznacza punkt startowy planowania jakości; właściwa interpretacja wymagań klienta zapobiega powstawaniu systemowych rozbieżności na dalszych etapach.
Faza 2 – Projektowanie i rozwój wyrobu	Opracowanie koncepcji produktu, modele CAD, analizy funkcjonalne i wstępne walidacje.	Pozwala wcześniej określić krytyczne charakterystyki jakościowe i wbudować wymagania jakościowe w projekt wyrobu.
Faza 3 – Projektowanie i rozwój procesu	Definiowanie przebiegu procesu, layoutów produkcyjnych, oprzyrządowania i metod kontroli.	Zapewnia powiązanie parametrów procesu z wymaganiami produktu; decyduje o zdolności procesu do spełnienia wymagań jakościowych.
Faza 4 – Walidacja wyrobu i procesu	Testy produktu i próbne uruchomienia procesu, ocena zdolności maszyn, badania MSA i SPC.	Potwierdza, że zarówno wyrób, jak i proces spełniają określone wymagania; ogranicza ryzyko niezgodności w produkcji seryjnej.
Faza 5 – Produkcja seryjna, ocena i działania korygujące	Rozpoczęcie produkcji seryjnej, monitorowanie stabilności i zdolności procesów, analiza informacji zwrotnych.	Umożliwia ciągłe doskonalenie jakości oraz szybkie reagowanie na niezgodności; zamyka pętlę PDCA w planowaniu jakości.

Tabela 2.2.1 charakteryzuje pięć faz APQP i ich wpływ na planowanie jakości. W fazie 1 kluczowe jest właściwe zrozumienie wymagań klienta i zakresu projektu, co stanowi punkt wyjścia dla holistycznego spojrzenia na jakość. Faza 2 pozwala na wczesne zidentyfikowanie krytycznych charakterystyk produktu i wbudowanie ich w projekt, natomiast faza 3 zapewnia powiązanie tych wymagań z parametrami procesu produkcyjnego i metodami kontroli. Faza 4 ma znaczenie weryfikacyjne – testy produktu i próbne uruchomienia procesu potwierdzają zgodność z wymaganiami, ograniczając ryzyko ujawnienia się błędów w produkcji seryjnej. Z kolei faza 5 koncentruje się na monitorowaniu stabilności procesu, analizie informacji zwrotnych oraz podejmowaniu działań korygujących, co umożliwia utrzymanie i doskonalenie jakości w długim cyklu życia wyrobu. W ten sposób wszystkie fazy tworzą logiczną i wzajemnie powiązaną strukturę, która zapewnia spójność procesu planowania jakości.

Tabela 2.2.2 przedstawia kluczowe elementy metodologii APQP, podkreślając, jak różne kryteria wpływają na skuteczność planowania jakości. Wybrane aspekty, takie jak struktura faz, wymagania klienta, analiza ryzyka, dokumentacja oraz wykorzystanie technologii cyfrowych,

wskazują na szeroki zakres zastosowania APQP w inżynierskim podejściu do jakości. Zawarte w zestawieniu informacje wskazują, że APQP nie ogranicza się jedynie do określenia kolejnych faz procesu realizacji projektu, lecz wykracza poza nie – stanowi zintegrowane podejście do jakości produktu i procesu, który angażuje zespoły z różnych obszarów działalności organizacji (takich jak inżynieria, produkcja, jakość, logistyka) we wspólny proces planowania, analizy ryzyka, diagnozowania i wdrażania zmian i dokumentowania wymagań. Takie rozwiązanie wzmacnia spójność procesu planowania jakości, sprzyja wymianie wiedzy, umożliwia lepszą identyfikację potencjalnych niezgodności oraz sprawniejsze wdrażanie działań doskonalących na każdym etapie realizacji projektu planowania i rozwoju produktu i procesu. Kompleksowe wykorzystanie APQP sprzyja przejrzystości i ujednoliceniu opracowywanych i stosowanych standardów jakościowych w organizacji, zapewniając lepszą współpracę pomiędzy poszczególnymi działami przedsiębiorstwa oraz łatwiejsze dostosowanie do zmieniających się wymagań odbiorców i rynku.

Tabela 2.2.2. Rozszerzona charakterystyka metodyki APQP w odniesieniu do kluczowych kryteriów planowania jakości (opracowanie własne [95, 4S- 5S])

Kryterium	Charakterystyka APQP
Struktura faz	Pięcioletni model od planowania do produkcji seryjnej; fazy powiązane i częściowo nakładające się, co umożliwia iteracyjne doskonalenie.
Integracja z IATF	Spójność z wymaganiami IATF 16949; APQP stanowi praktyczne narzędzie realizacji wymagań normy w obszarach planowania i audytowania jakości.
Analiza ryzyka	Kluczowy element metodyki; wykorzystuje Core Tools (DFMEA, PFMEA, Control Plan, SPC, MSA) w celu minimalizacji ryzyka niezgodności.
Dokumentacja	Ujednolicone formularze i zapisy (APQP Workbook, PPAP); przejrzysta baza dowodów dla audytów wewnętrznych i zewnętrznych.
Technologie cyfrowe	Coraz silniejsze wykorzystanie PLM, ERP, MES i cyfrowych baz danych; wsparcie dla integracji danych projektowych i produkcyjnych.
Zarządzanie zmianami	Formalny proces oceny i zatwierdzania zmian, z naciskiem na analizę wpływu na produkt, proces i klienta; powiązany z PPAP.
Zarządzanie wiedzą	Strukturyzacja doświadczeń projektowych, stosowanie Lessons Learned, budowanie bazy wiedzy dla przyszłych projektów.
Wymagania klienta	Fundament całej metodyki; wymagania są identyfikowane w fazie 1 i stanowią kryterium oceny w każdej fazie APQP.
Orientacja na klienta	Silne powiązanie planowania jakości z satysfakcją klienta i oceną dostawcy; jakość traktowana jako wartość dodana w relacjach B2B.
Ciągłe doskonalenie	Zgodność z cyklem PDCA; systematyczne zbieranie informacji zwrotnych i wdrażanie działań korygujących w fazie 5.
Globalna spójność	Narzędzie harmonizacji wymagań OEM i dostawców na całym świecie; redukcja różnic w interpretacji standardów jakości.
Wsparcie interdyscyplinarności	Tworzenie zespołów projektowych obejmujących inżynierię, produkcję, jakość i logistykę; zapewnia pełniejszy obraz ryzyka i wymagań.
Elastyczność i adaptacja	Możliwość dostosowania metodyki do skali projektu (program MAJOR vs. MINOR) oraz do złożoności produktu.
Powiązanie z innymi narzędziami	Integracja z QFD, 8D, VDA-RGA i narzędziami Lean Six Sigma; wspiera kompleksowe podejście do jakości.
Zrównoważony rozwój	Coraz częściej uwzględnia wymagania środowiskowe i regulacyjne (np. IMDS, REACH), powiązane z dokumentacją PPAP.

Tabela 2.2.2 wskazuje, że APQP nie jest jedynie zbiorem kolejnych faz, ale złożonym systemem, który obejmuje strukturę procesów planowania jakości, integrację kluczowych wymagań z normami branżowymi (takimi jak IATF 16949 czy ISO 9001), analizę ryzyka związanego z produktem i procesem, zarządzanie zmianami dotyczącymi projektu i procesu oraz zarządzanie wiedzą w zakresie doświadczeń z poprzednich projektów. Ujęcie to podkreśla, że skuteczność planowania jakości zależy od powiązania działań projektowych z praktycznym wykorzystaniem narzędzi, dokumentacji i doświadczeń organizacji [96].

Zrozumienie powyższych kryteriów pozwala lepiej dostrzec, dlaczego APQP podlega ciągłej ewolucji. Metodologia ta musi odpowiadać na nowe realia przemysłowe: skracające się cykle rozwojowe, rosnącą złożoność projektów, globalny charakter łańcuchów dostaw oraz potrzeba spójności standardów dotyczących jakości pomiędzy różnymi producentami i dostawcami. Z czasem okazało się, że wcześniejsze wersje podręcznika nie zawsze w pełni odzwierciedlały te wyzwania, co stworzyło przestrzeń dla ich aktualizacji [97].

Najnowsze wydanie APQP z 2024 roku wprowadza szereg zmian, które rozszerzają jego zakres i praktyczne zastosowanie. Wydzielenie planu kontroli jako osobnego dokumentu, formalne zarządzanie zmianami po akceptacji klienta czy obowiązkowy plan ograniczania ryzyk są odpowiedzią na potrzebę bardziej precyzyjnego nadzoru nad projektami. Równocześnie wprowadzenie przeglądów „Lessons Learned” i „Best Practices” wskazuje, że metodologia ta coraz mocniej akcentuje rolę uczenia się organizacyjnego i systematycznego gromadzenia wiedzy [95].

Kolejnym istotnym elementem jest wprowadzenie tzw. przeglądów bramkowych oraz większy nacisk na odpowiedzialność liderów projektów. To przesunięcie akcentu w stronę zarządzania procesem i podejmowania decyzji w kluczowych punktach programu sprawia, że APQP staje się narzędziem nie tylko planowania jakości, lecz także całościowego nadzoru nad rozwojem i industrializacją produktu. Dzięki temu organizacje mogą skuteczniej kontrolować ryzyko, szybciej reagować na problemy i lepiej wykorzystywać wcześniejsze doświadczenia w kolejnych projektach [4S- 5S].

Weryfikacja skuteczności planowania jakości wymaga formalnych mechanizmów potwierdzenia poprawności przyjętych założeń metodologicznych. W tym celu uzupełnieniem wymagań APQP jest podręcznik Production Part Approval Process (PPAP), który stanowi procedurę weryfikacji zgodności rzeczywistych możliwości produkcyjnych z teoretycznymi założeniami planowania jakości. Głównym celem PPAP jest formalna ocena i zatwierdzenie części (produktu) oraz procesu produkcyjnego przed rozpoczęciem produkcji seryjnej, zapewniając tym samym, że opracowane plany jakości będą skutecznie realizowane w warunkach przemysłowych [6S].

Podręcznik Production Part Approval Process (PPAP) stanowi fundamentalną procedurę stosowaną w przemyśle motoryzacyjnym oraz w branżach charakteryzujących się wysokimi wymaganiami dotyczącymi bezpieczeństwa i powtarzalności procesów produkcyjnych. Realizacja procedury PPAP ma na celu zapewnienie, że dostawca posiada zdolność do wytwarzania produktów zgodnie z wymaganiami klienta w sposób stabilny i kontrolowany, eliminując tym samym ryzyko wystąpienia wadliwych produktów i kosztownych korekt na późniejszych etapach cyklu życia produktu. Proces PPAP umożliwia kompleksową ocenę zarówno parametrów fizycznych i funkcjonalnych produktu, jak i zdolności procesu produkcyjnego do spełniania zdefiniowanych wymagań jakościowych [6S, 98].

Tabela 2.2.3. Wymagania dotyczące dokumentacji w procesie PPAP a faza APQP (opracowanie własne na podstawie [6S, 98])

Wymaganie	Poziom 1	Poziom 2	Poziom 3	Poziom 4	Poziom 5	Faza APQP
Dokumentacja konstrukcyjna wyrobu (zapisy z projektowania)	R	R	R	*	R	Faza 2
Dokumenty zmian konstrukcyjnych, technologicznych	R	S	S	*	R	Faza 2
Zatwierdzenie przez Dział Konstrukcji/Technologii Klienta	R	R	S	*	R	Faza 2
Analiza FMEA Konstrukcji (Design FMEA)	R	R	S	*	R	Faza 2
Graf przebiegu procesu i rozmieszczenia (Diagram przepływu procesu + Layout)	R	R	S	*	R	Faza 3
Analiza FMEA Procesu (Process FMEA)	R	R	S	*	R	Faza 3
Plan Kontroli (Control Plan)	R	R	S	*	R	Faza 3
Badania Analizy Systemu Pomiarowego (MSA)	R	R	S	*	R	Faza 4
Wyniki kontroli wymiarów	R	S	S	*	R	Faza 4
Zapisy z wyników badań materiałów / osiągnięć	R	S	S	*	R	Faza 4
Wstępne badanie procesu	R	R	S	*	R	Faza 4
Dokumentacja Kwalifikowanego Laboratorium	R	S	S	*	R	Faza 4
Raport Zatwierdzenia Wyglądu (AAR), jeśli wymagane	S	S	S	*	R	Faza 4
Części wzorcowe z produkcji	R	S	S	*	R	Faza 3 / 4
Próbki wzorcowe	R	R	R	*	R	Faza 3 / 4
Pomoce kontrolne	R	R	R	*	R	Faza 4
Zapisy zgodności ze Specyficznymi Wymaganiami Klienta	R	R	S	*	R	Faza 4
Gwarancja Przedłożonej Części (PSW)	S	S	S	S	R	Faza 4

Legenda:

S – przedłożyć klientowi i przechowywać kopię

R – przechowywać i udostępniać klientowi na żądanie

* – przechowywać i przedłożyć klientowi na żądanie

Uwagi:

W niektórych projektach, ze względu na niską złożoność wyrobu lub procesu, wymagania fazy 4 mogą być dostępne już w fazie 3.

Standardowy pakiet dokumentacji jakościowej procedury PPAP, zgodny z wymaganiami AIAG, obejmuje osiemnaście podstawowych elementów. W skład tego zestawu wchodzi m.in. dokumentacja konstrukcyjna, analizy D-FMEA i P-FMEA, plany kontroli, wyniki badań oraz Gwarancja Przedłożonej Części (PSW – Part Submission Warrant). Pełny wykaz wymaganych dokumentów oraz faz, od której poszczególne dane i dowody jakościowe powinny być dostępne, przedstawiono w tabeli 2.2.3. Procedura PPAP pozwala krok po kroku zweryfikować wszystkie istotne aspekty jakościowe produktu jeszcze przed rozpoczęciem produkcji seryjnej [77]. Zgodnie z wytycznymi AIAG, dokumentacja PPAP jest składana w fazie 4 APQP, po zakończeniu walidacji produktu i procesu, i stanowi formalne potwierdzenie gotowości dostawcy do wytwarzania wyrobu zgodnego z wymaganiami klienta [6S, 99].

Procedura PPAP to nie tylko formalna akceptacja produktu, ale podsumowanie wszystkich działań mających kluczowe znaczenie dla zapewnienia jakości produktu i procesu jego wytwarzania. Jego skuteczność zależy od wcześniejszego, systematycznego rozpoznania i zabezpieczenia obszarów ryzyka. Ważnym elementem tego procesu jest analiza potencjalnych niezgodności, która pozwala je wyeliminować, zanim pojawią się w produkcji. W tym kontekście jednym z najważniejszych instrumentarium planowania jakości jest metoda Failure Mode and Effects Analysis (FMEA) – metodyka będąca fundamentem predykcyjnego podejścia do projektowania jakości produktu i procesu [3S].

Metoda FMEA jest uniwersalna i wykorzystywana do identyfikacji i oceny potencjalnych niezgodności w produktach i procesach w różnych gałęziach przemysłu. Jej kluczową wartością jest możliwość systematycznej oceny ryzyka, niezależnie od stopnia złożoności technicznej analizowanego produktu lub procesu produkcyjnego. Skuteczność analizy FMEA w dużej mierze zależy od szczegółowej dekompozycji badanego obiektu na podsystemy oraz od precyzji w opracowaniu logicznej struktury analizy [3S].

Nowoczesne podejście, zgodne z wytycznymi AIAG i VDA, podkreśla znaczenie opracowania struktury analizy FMEA jako fundamentu procesu zarządzania ryzykiem. Struktura ta obejmuje hierarchiczną identyfikację poziomów (system, zespół, komponent) i przypisanie im odpowiadających funkcji oraz wymagań jakościowych. Takie uporządkowanie pozwala nie tylko na wykrycie potencjalnych przyczyn uszkodzeń, lecz także na przeanalizowanie ich wpływu na funkcjonowanie produktu jako całości i wyznaczenie powiązań pomiędzy komponentami. W przypadku produktów mechatronicznych o wysokim stopniu integracji technicznej poprawnie przeprowadzona analiza FMEA pozwala określić / wskazać zależności krytyczne i przypisać odpowiedzialność za działania zapobiegawcze właściwym zespołom inżynierskim, co podnosi skuteczność planowania jakości oraz minimalizuje ryzyko niezgodności na wszystkich etapach cyklu życia wyrobu [100].

Należy podkreślić, że metoda FMEA opiera się na procesie iteracyjnym jej zastosowania, wyniki analiz muszą być regularnie aktualizowane – zwłaszcza w kontekście zmian konstrukcyjnych produktów, modyfikacji wymagań klienta, nowych wyników walidacji czy pozyskiwanych danych z eksploatacji produktu. Brak systematycznych aktualizacji prowadzi do stopniowej

utrąty aktualności analizy ryzyka, co w konsekwencji może skutkować obniżeniem skuteczności nadzoru nad jakością wyrobu i procesu oraz generować mylne przekonanie o spełnieniu wymagań jakościowych [3S].

Do zalet stosowania metody FMEA w analizie złożonych produktów można zaliczyć [3S, 102]:

- Możliwość strukturalnego podejścia do złożonych produktów – metoda wymusza logiczne rozbięcie systemu i precyzyjne zdefiniowanie jego funkcji, co zwiększa przejrzystość analizy.
- Wspieranie współpracy interdyscyplinarnej – wspólny model FMEA integruje wiedzę specjalistów z różnych obszarów technicznych, takich jak mechanika, elektronika czy inżynieria systemów.
- Identyfikacja ukrytych interakcji – analiza pozwala wykryć niezgodności wynikające z niewłaściwego współdziałania komponentów, nawet jeśli każdy z nich spełnia indywidualne wymagania.
- Zwiększenie spójności i trafności oceny ryzyka – podejście oparte na analizie funkcji i skutków uszkodzeń umożliwia precyzyjniejsze ustalanie priorytetów dla działań zapobiegawczych.
- Wczesne wykrywanie zagrożeń projektowych – prawidłowo przeprowadzona analiza FMEA na etapie projektowania ogranicza liczbę niezgodności ujawnianych podczas walidacji i w fazie produkcyjnej.

Metoda FMEA posiada również ograniczenia i związane z nimi wyzwania dotyczące praktycznego zastosowania [3S]:

- Znaczące nakłady czasowe – szczegółowe opracowanie struktury analizy i uwzględnienie wszystkich możliwych trybów niezgodności wymaga czasu oraz zaangażowania doświadczonego zespołu.
- Złożoność zarządzania dokumentacją – przy częstych zmianach w projekcie konieczne jest systematyczne aktualizowanie analizy FMEA, co może być trudne bez odpowiednich narzędzi i ustalonych procedur.
- Ryzyko niespójności w rozumieniu funkcji produktu i jego elementów – brak wspólnego zrozumienia struktury analizowanego systemu przez członków zespołu może prowadzić do luk w analizie.
- Potrzeba integracji z innymi narzędziami jakościowymi – efektywne wdrożenie analizy FMEA wymaga jej powiązania z systemem APQP, SPC, PPAP oraz procedurami zarządzania zmianą.
- Wymagania wobec organizacji – realizacja analizy FMEA zgodnie z podejściem AIAG & VDA wymaga dojrzałości procesowej organizacji oraz zdolności do pracy w oparciu o szczegółowe dane strukturalne i funkcjonalne dotyczące produktu oraz procesu.

Wprowadzenie wspólnego podręcznika AIAG & VDA w 2019 roku stanowiło istotną zmianę w podejściu do FMEA. Nowa metodyka zastąpiła dotychczasowe podejście oparte na wskaźniku RPN, wprowadzając siedmioetapowy proces analizy i nową logikę ustalania priorytetów działań. Zmiany te miały na celu zwiększenie skuteczności w identyfikacji ryzyka, lepszą

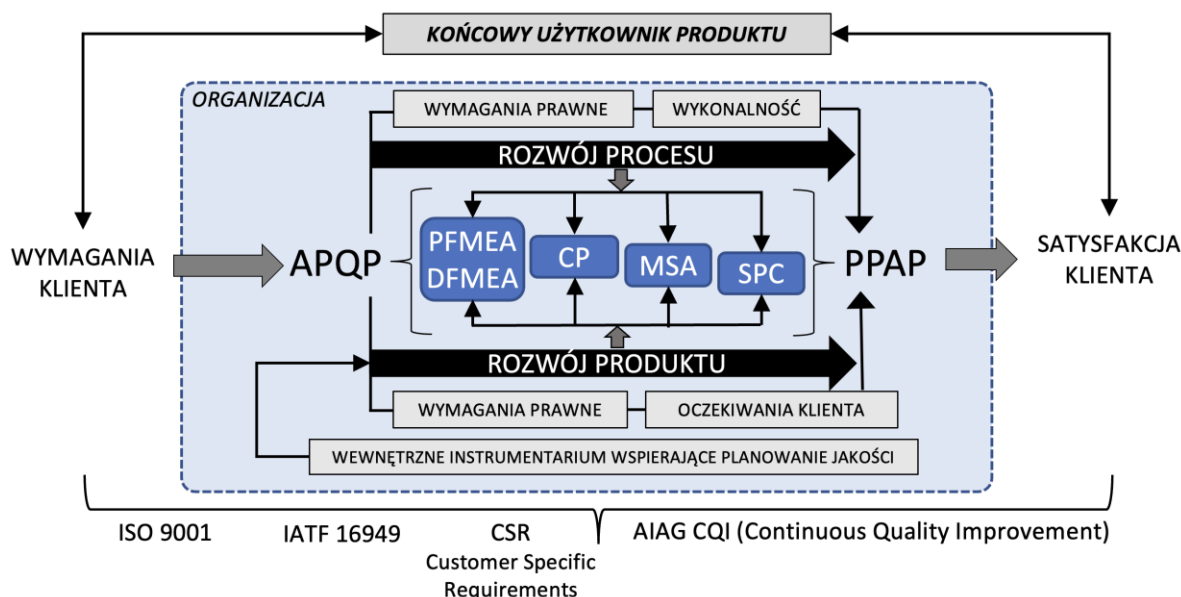
integrację z innymi narzędziami jakości oraz poprawę przejrzystości dokumentacji. Tabela 2.2.4 zestawia kluczowe różnice pomiędzy starszą wersją podręcznika AIAG (2008) a nową metodyką AIAG & VDA (2019), wskazując zarówno korzyści z wprowadzonych zmian, jak i potencjalne wyzwania dla przedsiębiorstw [103- 106].

Tabela 2.2.4. Porównanie podejścia do FMEA zawartego w podręczniku AIAG FMEA edycja czwarta z roku 2008 z podręcznikiem wydanym przez AIAG i VDA w roku 2019 (opracowanie własne bazując na 3S)

Obszar	AIAG FMEA edycja czwarta (2008)	AIAG i VDA Podręcznik FMEA (2019)	Korzyści z wprowadzonych zmian	Potencjalne wyzwania dla przedsiębiorstw
Struktura analizy	Analiza ryzyka oparta na trzech kategoriach: Severity (S), Occurrence (O), Detection (D). Wynik RPN ($S \times O \times D$) decydował o priorytecie działań.	Nowy 7-etapowy proces, obejmujący analizę struktury, funkcji, trybów uszkodzeń, ryzyka oraz działań korygujących.	Dokładniejsza identyfikacja ryzyka, eliminacja błędnej priorytetyzacji działań.	Dłuższy czas analizy wynikający z potrzeby budowy struktury systemu oraz konieczności dostosowania procedur jakości do metodyki AIAG & VDA.
Identyfikacja priorytetów działań	Priorytetyzacja na podstawie wskaźnika RPN – możliwość błędnego wskazania działań o niskim priorytecie jako istotnych i odwrotnie.	Zastąpienie wskaźnika RPN metodą Action Priority (AP), klasyfikującą działania jako High, Medium, Low.	Trafniejsze ustalanie priorytetów i skuteczniejsza eliminacja rzeczywistych zagrożeń wystąpienia niezgodności.	Konieczność zmiany sposobu oceny ryzyka oraz przeszkolenia personelu w zakresie stosowania wskaźnika AP.
Integracja z innymi metodami jakości	FMEA stosowane jako odrębne narzędzie, bez formalnych powiązań z APQP i PPAP.	Ścisłe powiązanie FMEA z APQP, PPAP i SPC, traktowanie jej jako elementu systemu zarządzania jakością.	Spójniejsze podejście do eliminacji niezgodności i większa zgodność z IATF 16949.	Potrzeba ściślejszej współpracy między działami jakości i produkcji.
Podejście do dokumentacji	Dokumentacja często ograniczona, brak wymagań dotyczących szczegółowego śledzenia działań korygujących.	Pełna dokumentacja, obowiązkowe śledzenie działań korygujących i ich skuteczności.	Większa przejrzystość dokumentacji produktu i procesu, lepsza kontrola realizacji działań.	Większe obciążenie administracyjne, konieczność cyfryzacji dokumentacji.

Skuteczne planowanie jakości w przemyśle motoryzacyjnym wymaga nie tylko właściwego zastosowania inżynierskiego instrumentarium jakościowego, lecz przede wszystkim dogłębnego zrozumienia ich wzajemnych powiązań i systemowych zależności. Metodologie APQP, PPAP, FMEA oraz inne inżynierskie instrumenty jakościowe stosowane w nadzorze i doskonaleniu jakości produktów i procesów produkcyjnych – takie jak Plan Kontroli, Analiza Systemów Pomiarowych (MSA) czy Statystyczne Sterowanie Procesem (SPC) – tworzą obecnie w przedsiębiorstwach zintegrowany system planowania jakości, gdzie wszystkie elementy uzupełniają i wzmacniają się nawzajem, działając synergicznie [3S- 4S, 106- 107] .

Rysunek 2.2.2 ilustruje koncepcję planowania jakości, w której wymagania klienta stanowią dane wejściowe do metodyki APQP integrującej rozwój produktu i procesu produkcyjnego na poziomie organizacji. Centralnym elementem diagramu są kluczowe narzędzia jakościowe: P-FMEA, D-FMEA, Plan Kontroli (CP), MSA oraz SPC, które służą jako podstawa do opracowania kompletnej dokumentacji PPAP. Schemat przedstawia dwukierunkowy przepływ informacji pomiędzy odbiorcą produktu a działaniami związanymi z planowaniem jakości. Formalne ramy odniesienia całego podejścia wyznaczane są przez wymagania norm ISO 9001, IATF 16949, wymagania klienta (CSR) oraz specyfikacje CQI (Continuous Quality Improvement) opracowywane przez AIAG. Organizacja uwzględnia wymagania prawne i dotyczące wykonalności jako elementy wejściowe procesu planowania jakości, przy wsparciu własnego instrumentarium inżynierskiego. Rezultatem tych działań jest osiągnięcie satysfakcji klienta, co zamyka pętlę sprzężenia zwrotnego oraz zapewnia ciągłe doskonalenie jakości. Strzałki na diagramie – rysunek 2.2.2 ilustrują przepływ informacji pomiędzy poszczególnymi elementami systemu planowania jakości [108].



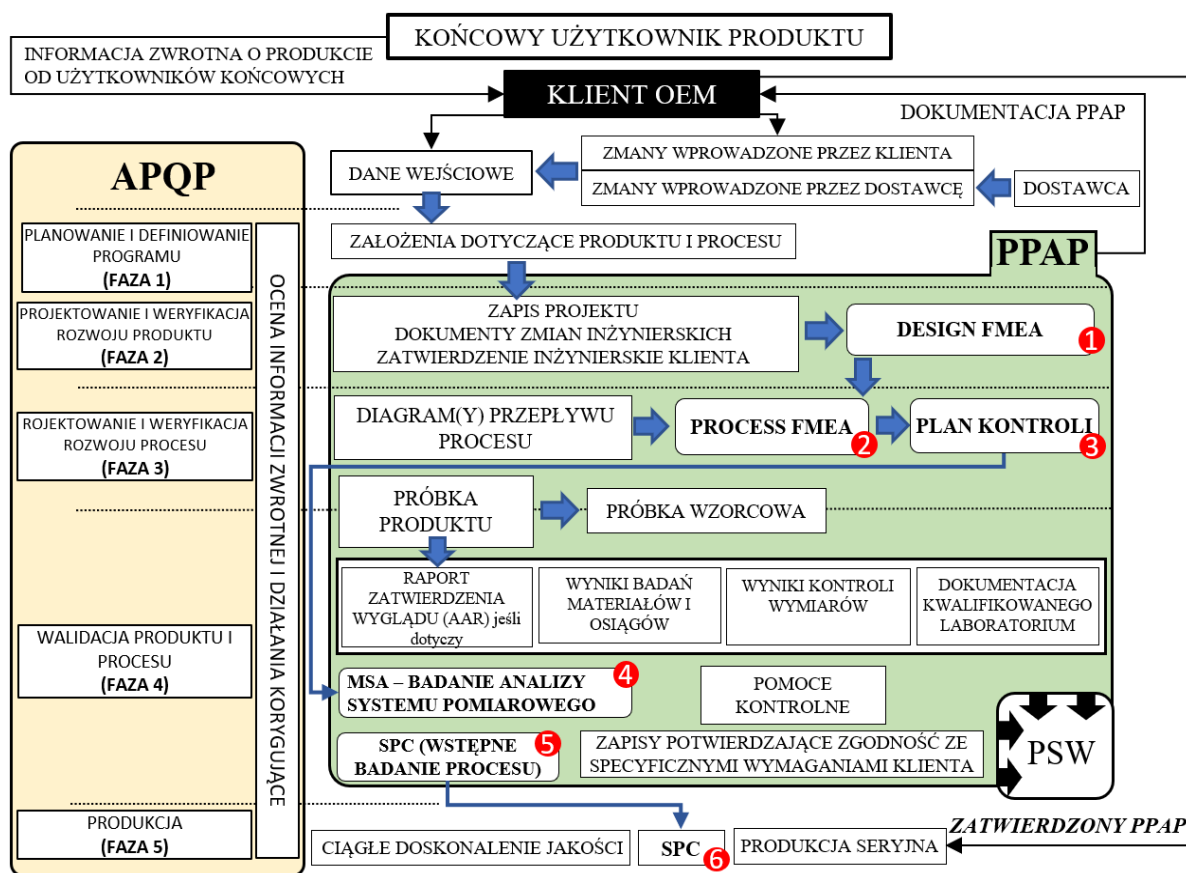
Rysunek 2.2.2. Schemat zależności pomiędzy fazami APQP a elementami PPAP (opracowanie własne bazujące na standardach branżowych [1S- 9S, 108])

Zaawansowane Planowanie Jakości Produktu (APQP) pełni współcześnie rolę wiodącego standardu metodologicznego dla planowania i nadzorowania faz rozwoju produktu oraz procesu w sektorze motoryzacyjnym. Integracja kluczowego instrumentarium jakościowego – takiego jak FMEA, Plan Kontroli, Analiza Systemów Pomiarowych (MSA) czy Statystyczne Sterowanie Procesem (SPC) – umożliwia opracowanie i wdrożenie spójnego systemu nadzoru nad jakością w całym cyklu rozwoju produktu [108].

Obowiązek stosowania APQP w branży motoryzacyjnej przekłada się na standaryzację wymagań jakościowych w całym łańcuchu dostaw, usprawnia przepływ informacji oraz jednoznacznie określa odpowiedzialność za poszczególne działania na kolejnych etapach

realizacji projektu. Szczególnie istotne są współzależności pomiędzy fazami APQP: każda faza jest powiązana informacyjnie i decyzyjnie z pozostałymi – wyniki analiz i wnioski z wcześniejszych etapów stanowią dane wejściowe do kolejnych faz, determinując sposób projektowania, doboru narzędzi, zakres walidacji i wymagania dla dokumentacji. Przykładowo, analiza FMEA przeprowadzona na etapie projektowania produktu wpływa na ustalenie krytycznych charakterystyk w Planie Kontroli oraz wymaganych badań w procesie produkcyjnym, zaś informacje zwrotne z walidacji i użytkowania produktu inicjują aktualizacje i działania doskonalące na wcześniejszych etapach [3S- 4S, 109].

Powiązania te materializują się również na poziomie dokumentacji zatwierdzającej produkt i proces, w szczególności w ramach PPAP, gdzie kompletność i jakość wymaganych dokumentów jest ściśle uzależniona od prawidłowej realizacji kolejnych faz APQP i zintegrowanego wykorzystania instrumentarium jakościowego. Takie podejście gwarantuje uzyskanie zgodności pomiędzy planowaniem, wdrażaniem i zatwierdzaniem produktu oraz pozwala na systemowe identyfikowanie niezgodności, skuteczne zarządzanie ryzykiem i ciągłe doskonalenie procesów produkcyjnych w przemyśle motoryzacyjnym. Zależności te przedstawiono na rysunku 2.2.3, który wskazuje na powiązania pomiędzy fazami APQP a dokumentacją i wymaganiami PPAP [108].



Rysunek 2.2.3. Schemat zależności pomiędzy fazami APQP a elementami PPAP (opracowanie własne bazujące na standardach branżowych [1S- 9S, 108])

Metoda FMEA pełni rolę podstawowego narzędzia analizy ryzyka, stosowanego zarówno na poziomie konstrukcji (D-FMEA), jak i procesu produkcyjnego (P-FMEA). D-FMEA realizowana jest w fazie projektowania produktu i stanowi podstawę do opracowania Planu Kontroli dla etapu / fazy prototypowania. Z kolei analiza P-FMEA wykonywana jest podczas projektowania procesu i służy jako fundament dla Planu Kontroli w produkcji wstępnej i seryjnej. Oba zakresy analizy FMEA stanowią nieodłączny element dokumentacji PPAP, co podkreśla ich kluczową rolę w systemowym zapewnieniu spójności planowania jakości na wszystkich etapach cyklu życia produktu [108].

Analiza Systemów Pomiarowych (MSA) stanowi jedno z kluczowych ogniw planowania jakości w strukturze metodyki APQP. Jej głównym celem jest zapewnienie wiarygodności i powtarzalności wszystkich rezultatów pomiarowych pozyskiwanych na różnych etapach realizacji Planu Kontroli – od fazy prototypowania, poprzez wdrożenie, po produkcję seryjną. Wdrożenie i konsekwentne utrzymywanie wymagań określonych w podręczniku MSA pozwala na systematyczną ocenę, czy wykorzystywane systemy pomiarowe w procesie produkcyjnym są odpowiednio precyzyjne i stabilne oraz czy umożliwiają skuteczne monitorowanie cech krytycznych produktu i procesu [4S, 8S].

W ramach analizy MSA dokonuje się oceny kluczowych właściwości systemów pomiarowych – takich jak powtarzalność, odtwarzalność, liniowość, stabilność oraz dokładność – które przesądzają o przydatności danego rozwiązania do bieżącego nadzoru jakościowego. Ocena tych właściwości stanowi fundament potwierdzenia zgodności procesów pomiarowych z wymaganiami klienta oraz zapewnienia, że wyniki pomiarów będą wiarygodnym źródłem informacji [8S].

W kontekście planowania jakości wdrożony system MSA pełni funkcję walidacyjną: umożliwia obiektywną weryfikację czy środki kontroli wymienione w Planie Kontroli – powiązanym bezpośrednio z analizą FMEA i wynikającym z niej wymaganiami odnośnie do parametrów krytycznych – są technicznie zdolne do zagwarantowania efektywnego nadzoru nad kluczowymi cechami wyrobu oraz procesu produkcyjnego. Tym samym MSA zamyka pętlę planowania jakości, przechodząc od projektowania mechanizmów kontroli do ich praktycznego potwierdzenia przed rozpoczęciem produkcji seryjnej. Jak wskazano na rysunku 2.2.2, MSA pozostaje w ścisłym powiązaniu zarówno z działaniami opartymi na analizie FMEA, jak i z opracowywanymi Planami Kontroli, zapewniając integralność całego systemu nadzoru nad jakością produktu i procesu produkcyjnego [4S, 5S].

Statystyczne Sterowanie Procesem (SPC) stanowi istotny element instrumentarium planowania jakości i jest stosowane na dwóch kluczowych etapach cyklu rozwoju produktu: jako wstępna ocena procesu (ang. *initial process studies*) oraz jako narzędzie do ciągłego monitorowania produkcji seryjnej. Zastosowanie SPC umożliwia ilościową ocenę stabilności procesu produkcyjnego oraz wczesne wykrywanie odchyleń, zanim dojdzie do powstania produktu niezgodnego z wymaganiami jakościowymi. Dzięki temu rozwiązaniu organizacja

może nie tylko monitorować bieżący poziom zdolności procesu, ale także identyfikować źródła zmienności i wdrażać systemowe działania doskonalące ukierunkowane na ich eliminację [9S].

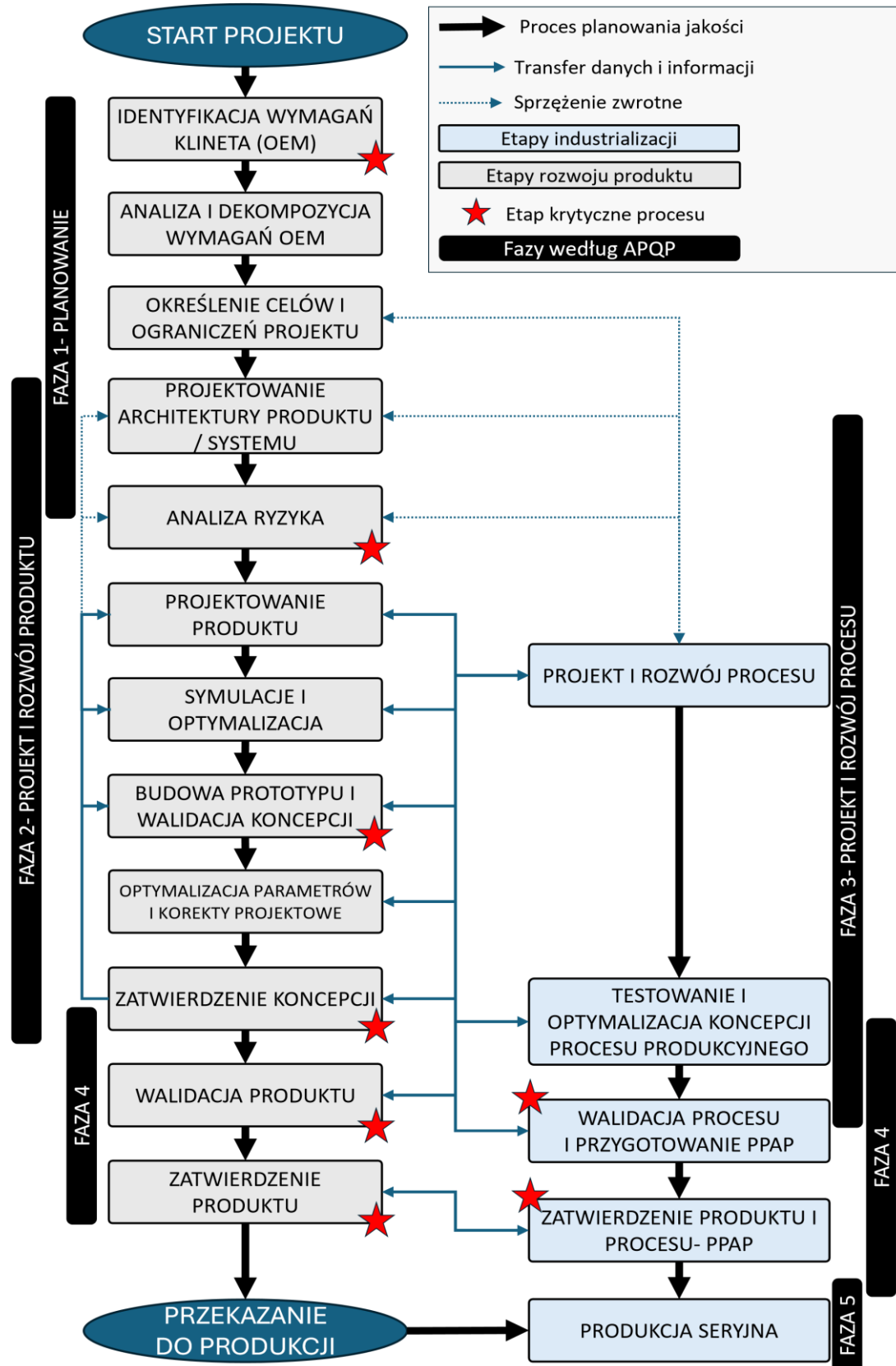
W strukturze metodologii APQP, SPC pełni funkcję operacyjnego potwierdzenia realizacji założeń określonych podczas planowania jakości – umożliwia bieżącą weryfikację czy procesy produkcyjne spełniają wymagania jakościowe ustalone w analizie FMEA oraz Planie Kontroli. W ten sposób SPC stanowi konsekwentne domknięcie sekwencji użycia instrumentarium jakościowego, zapewniając zamknięcie pętli planowania, kontroli i doskonalenia jakości w oparciu o rzeczywiste i aktualne dane procesowe. Na rysunku 2.2.2 SPC zostało przedstawione jako rozwinięcie i praktyczne zastosowanie ustaleń z analizy FMEA i oceny systemów pomiarowych MSA: najpierw w formie badań wstępnych procesu, a następnie jako narzędzie ciągłego nadzoru nad stabilnością produkcji seryjnej [4S, 9S].

Współczesne podejście do planowania jakości w przemyśle motoryzacyjnym wykracza poza samo wdrażanie metodologii, takich jak: APQP, FMEA czy PPAP. Choć są one wymagane przez producentów OEM i dostawców wyższego rzędu, skuteczność nadzoru jakości zależy przede wszystkim od umiejętnego, elastycznego ich dostosowania – z uwzględnieniem specyfiki produktu, wymagań klienta i złożoności procesów [108- 111].

Uzupełnieniem standardowych metodologii są podejścia Lean Manufacturing i Six Sigma, które kształtują kulturę organizacyjną ukierunkowaną na doskonałość operacyjną. Lean Manufacturing koncentruje się na eliminacji marnotrawstwa i usprawnieniu przepływu wartości, co w planowaniu jakości przekłada się na redukcję nadmiarowych kontroli, standaryzację dokumentacji procesowej oraz sprawniejszą realizację działań wynikających z APQP i PPAP. Narzędzia takie jak: 5S, mapowanie strumienia wartości czy Just-in-Time wspierają szybsze zatwierdzanie nowych komponentów, usprawniają przepływ informacji pomiędzy zespołami projektowymi i produkcyjnymi oraz zwiększają efektywność realizowanych procesów [112].

Six Sigma stanowi zaawansowane podejście oparte na narzędziach statystycznych i analizie danych, ukierunkowane na redukcję zmienności procesów oraz minimalizację ryzyka powstawania niezgodności. Umożliwia precyzyjną identyfikację przyczyn odchyień, optymalizację kluczowych parametrów produktów i procesów oraz wdrażanie udoskonaleń popartych obiektywną weryfikacją efektów. W ten sposób buduje kulturę ciągłego doskonalenia, zwiększa przewidywalność procesów i poprawia realizację celów jakościowych [113- 114].

Efektywna implementacja Lean i Six Sigma w warunkach przemysłowych wymaga ich integracji ze strukturą organizacyjną oraz dopasowania do specyfiki realizowanych projektów. Przykład takiego podejścia ilustruje rysunek 2.2.3, przedstawiający referencyjny model planowania jakości z perspektywy dostawcy Tier 1 (bezpośredniego dostawcy komponentów lub systemów do producenta pojazdów – OEM). Model ten obejmuje cały cykl życia projektu – od interpretacji wymagań klienta OEM, przez rozwój produktu i projektowanie procesu, po zatwierdzenie produktu do produkcji seryjnej [4S, 116].



Rysunek 2.2.4. Model planowania jakości w procesie rozwoju i industrializacji produktu- perspektywa organizacji Tier 1 (opracowanie własne bazujące na [4S])

Model (rys. 2.2.3) opiera się na dwóch równoległych strumieniach działań: rozwoju produktu i rozwoju procesu. Ich synchronizacja oraz bieżąca wymiana danych stanowią fundament skutecznego wdrażania nowych projektów gwarantując najwyższy poziom spełnienia wymagań i skrócenia czasu pełnego wdrożenia projektu. Poszczególne etapy realizacji procesu rozwoju i industrializacji są ze sobą powiązane nie tylko poprzez transfer danych, ale także poprzez liczne sprzężenia zwrotne, które umożliwiają iteracyjne doskonalenie koncepcji, weryfikację założeń i szybkie reagowanie na zmienne warunki projektowe. Obecność tych iteracji – widocznych na schemacie jako linie sprzężenia zwrotnego – podkreśla nieliniowy charakter procesów planowania jakości, szczególnie w przypadku bardziej złożonych projektów [4S].

Granica pomiędzy rozwojem produktu (po lewej stronie modelu) a industrializacją (po prawej stronie) nie jest „sztywna”. W praktyce jej położenie zależy od specyfiki projektu, stopnia innowacyjności rozwiązania, poziomu integracji pomiędzy zespołami odpowiedzialnymi za produkt i proces oraz szczegółowości wymagań klienta. W projektach o wysokiej złożoności technicznej lub z krótkimi terminami realizacji często obserwuje się przenikanie obu obszarów: część działań przygotowawczych dla procesu produkcyjnego – takich jak projektowanie oprzyrządowania, walidacja zdolności maszyn czy przygotowanie dokumentacji procesowej – może być uruchamiana równolegle z finalizacją projektu produktu. Z kolei w przypadku konieczności wprowadzenia zmian konstrukcyjnych po wynikach testów prototypów, prace projektowe nad produktem mogą trwać już w fazie zaawansowanych przygotowań do produkcji seryjnej. Takie nakładanie się etapów wymaga ścisłej koordynacji harmonogramów, spójnego systemu wymiany danych oraz precyzyjnego zarządzania ryzykiem, aby uniknąć kosztownych iteracji i opóźnień w uruchomieniu produkcji [4S].

Wraz ze wzrostem złożoności systemu (produktu) – rozumianej jako liczba i różnorodność powiązanych ze sobą komponentów oraz realizowanych przez nie funkcji – rośnie znaczenie możliwości wielokrotnego przeglądu, weryfikacji i aktualizacji danych projektowych. Regularne powracanie do kluczowych założeń konstrukcyjnych i wyników analiz, w tym analiz ryzyka, umożliwia wczesne wykrywanie potencjalnych niezgodności, dostosowywanie projektu do zmieniających się wymagań oraz utrzymywanie spójności pomiędzy rozwiązaniami technicznymi a wymaganiami jakościowymi. Uwzględnienie perspektywy ryzyka na każdym etapie planowania jakości pozwala lepiej priorytetyzować działania prewencyjne i korygujące, minimalizując prawdopodobieństwo wystąpienia krytycznych problemów w dalszych fazach cyklu życia produktu [3S, 4S].

Poniżej zaprezentowano opis głównych etapów modelowego podejścia do planowania jakości (Tabela 2.2.5), obejmującego równolegle prowadzone działania w obszarze rozwoju produktu i rozwoju procesu (Tabela 2.2.6). Zestawienie uwzględnia ich cel, typowe wejścia i wyjścia dla poszczególnych etapów, oraz powiązania w strukturze projektu. Wyróżniono etapy krytyczne, których prawidłowa realizacja ma decydujące znaczenie dla osiągnięcia wymaganych parametrów jakościowych i terminowego uruchomienia produkcji.

Tabela 2.2.5. Etapy projektu w odniesieniu do faz APQP – charakterystyka, wejścia i wyjścia (opracowanie własne bazujące na [4S])

Etap projektu	Faza APQP	Charakterystyka	Wejście	Wyjście
Identyfikacja wymagań klienta (OEM) (krytyczne)	Faza 1	Analiza specyfikacji technicznych, rysunków, CSR, planów walidacyjnych i harmonogramu.	Dokumentacja i dane od klienta	Zdefiniowany zakres projektu, usystematyzowana dokumentacja wymagań
Analiza i dekompozycja wymagań OEM (krytyczne)	Faza 1	Przekładanie wymagań ogólnych na mierzalne cechy produktu i procesu.	Wymagania klienta	Struktura wymagań technicznych, dane do analizy ryzyka
Określenie celów i ograniczeń projektu	Faza 1	Definicja ram projektu: koszty, czas, zasoby, ograniczenia technologiczne.	Struktura wymagań technicznych	Zatwierdzony plan projektowy
Projektowanie architektury produktu (krytyczne)	Faza 2	Podział produktu na komponenty, przypisanie funkcji, określenie interfejsów i granic systemu.	Struktura wymagań technicznych	Model funkcjonalny, dane wejściowe do D-FMEA
Analiza ryzyka – D-FMEA (krytyczne)	Faza 2	Identyfikacja potencjalnych niezgodności konstrukcyjnych i ocena ich wpływu.	Model funkcjonalny, wymagania techniczne	Macierz ryzyka, plan działań zapobiegawczych
Projektowanie produktu (krytyczne)	Faza 2	Opracowanie modelu CAD, dobór materiałów, określenie parametrów geometrycznych i funkcjonalnych.	Dane z D-FMEA	Dokumentacja konstrukcyjna, dane do symulacji
Symulacje i optymalizacja produktu	Faza 2	Analiza wirtualna, optymalizacja wymiarowa, ocena wytrzymałości i niezawodności.	Dokumentacja CAD, dane materiałowe	Raporty z analiz, korekty projektowe
Budowa prototypu i walidacja koncepcji (krytyczne)	Faza 2	Fizyczne sprawdzenie rozwiązań, testy funkcjonalne, weryfikacja wykonalności.	Dokumentacja konstrukcyjna	Raporty z testów, dane do optymalizacji
Zatwierdzenie koncepcji produktu	Faza 2	Decyzja o przejściu do dalszych etapów na podstawie testów i analiz.	Wyniki walidacji	Zatwierdzone wymagania jakościowe, plan walidacji systemowej
Walidacja produktu (krytyczne)	Faza 4	Testy środowiskowe, trwałościowe, EMC, funkcjonalne i dynamiczne.	Prototypy	Raporty walidacyjne, dane do PPAP
Zatwierdzenie produktu	Faza 4	Potwierdzenie zgodności z wymaganiami i gotowości do industrializacji.	Raporty walidacyjne, dokumentacja jakościowa	Zgoda na rozpoczęcie produkcji próbnej
Projekt i rozwój procesu (krytyczne)	Faza 3	Projektowanie linii, layoutów, instrukcji, planów kontroli, dobór maszyn i oprzyrządowania.	Dokumentacja produktu, wymagania procesowe	Dokumentacja procesowa, dane do P-FMEA
Analiza ryzyka – P-FMEA (krytyczne)	Faza 3	Identyfikacja potencjalnych niezgodności procesowych i wdrożenie działań zapobiegawczych.	Dane procesowe, wymagania jakościowe	Plan działań, aktualizacja planu kontroli
Testowanie i optymalizacja procesu	Faza 3	Weryfikacja ergonomii, wydajności, bezpieczeństwa i czasów cyklu.	Dokumentacja procesowa, layouty, plany kontroli	Zatwierdzony proces produkcyjny, dane do PPAP
Produkcja próbna i zatwierdzenie procesu (PPAP) (krytyczne)	Faza 4–5	Formalne potwierdzenie zdolności procesu do spełnienia wymagań.	Raporty z testów produkcyjnych, dokumentacja PPAP	Zgoda na uruchomienie produkcji seryjnej

Projektowanie współbieżne stanowi jedno z kluczowych podejść we współczesnym planowaniu jakości. Jego istota polega na równoległym prowadzeniu działań związanych z rozwojem produktu i procesu, co pozwala skrócić czas realizacji projektu, ograniczyć ryzyko kosztownych zmian oraz zapewnić lepszą spójność między wymaganiami konstrukcyjnymi a możliwościami produkcyjnymi. W ramach metodologii APQP współbieżność realizacji pewnych działań jest szczególnie istotna w fazach 2 i 3, gdzie opracowanie dokumentacji produktu jest bezpośrednio powiązane z projektowaniem procesu [45].

Tabela 2.2.6 przedstawia zestawienie kluczowych etapów projektu produktu i procesu, w których działania prowadzone są równolegle. Zestawienie to uwidacznia, jak wymiana informacji pomiędzy zespołami konstrukcyjnymi i procesowymi umożliwia bieżące uwzględnianie wyników analiz ryzyka, symulacji i walidacji, a tym samym wspiera bardziej efektywne planowanie jakości.

Tabela 2.2.6. Projektowanie współbieżne w procesie APQP (opracowanie własne bazujące na [45])

Etap projektu (produkt)	Etap projektu (proces)	Faza APQP	Charakter współbieżności
Projektowanie architektury produktu	Wstępne planowanie procesu	Faza 2 ↔ Faza 3	Równoległe definiowanie struktury produktu i procesu produkcyjnego
Analiza ryzyka D-FMEA	Wstępna analiza P-FMEA	Faza 2 ↔ Faza 3	Wspólna ocena ryzyka konstrukcji i procesu, wymiana danych wejściowych
Projektowanie produktu (CAD, materiały, parametry)	Projektowanie procesu (layout, oprzyrządowanie, plan kontroli)	Faza 2 ↔ Faza 3	Równoległe opracowywanie dokumentacji wyrobu i dokumentacji procesu
Symulacje i optymalizacja produktu	Weryfikacja i optymalizacja procesu	Faza 2 ↔ Faza 3	Synchronizacja wyników symulacji właściwości produktu z testami ergonomii i wydajności procesu
Budowa prototypu i walidacja koncepcji	Testy pilotażowe procesu	Faza 2 ↔ Faza 3–4	Prototyp produktu weryfikowany równoległe z przygotowaniem próbnej produkcji
Walidacja produktu	Walidacja procesu (zdolności, SPC, MSA)	Faza 4	Jednoczesna ocena zgodności produktu i zdolności procesu

W celu identyfikacji etapów krytycznych mających istotne znaczenie dla skuteczności procesu planowania jakości opracowano zestaw kryteriów oceny znaczenia poszczególnych faz procesu rozwoju i industrializacji produktu. Każde kryterium odnosi się do obszarów podwyższonego ryzyka wystąpienia niezgodności, podejmowania kosztownych decyzji lub powstawania niespójności pomiędzy wymaganiami klienta a dokumentacją projektową. Stosowanie tych

kryteriów umożliwia wskazanie faz wymagających szczególnej uwagi, ścisłej współpracy zespołów projektowych oraz doprecyzowania danych wejściowych.

Tabela 2.2.7 przedstawia kryteria planowania jakości, które pomagają ocenić, w jakich obszarach projektu istnieje największe ryzyko wystąpienia niezgodności. Każde z kryteriów zostało opisane pod kątem jego znaczenia dla procesu rozwoju i industrializacji produktu, co pozwala skuteczniej przygotować działania zapobiegawcze i zapewnić zgodność z wymaganiami jakościowymi.

Tabela 2.2.7. Kryteria identyfikacji elementów krytycznych w planowaniu jakości (Tier 1) (opracowanie własne)

Lp.	Kryterium	Opis
1	Wpływ interpretacji wymagań na ryzyko rozbieżności z oczekiwaniami OEM (Faza 1)	Kluczowy moment dla prawidłowego zrozumienia, przetworzenia i implementacji wymagań klienta. Błędna interpretacja może prowadzić do odchyień systemowych, skutkujących niespójnością między projektem, procesem a wymaganiami OEM, a w konsekwencji brakiem zgodności produktu z oczekiwaniami klienta.
2	Ryzyko kosztownych decyzji i późnych zmian (Faza 2–3)	Etap podejmowania wiążących decyzji projektowych i procesowych. Zmiany wprowadzane w tym okresie generują wysokie koszty, opóźnienia oraz utrudniają eliminację niezgodności powstałych na wcześniejszych etapach rozwoju.
3	Niestabilne i niekompletne dane wejściowe (Faza 1)	We wczesnych fazach planowania jakości występuje duża niepewność danych. Brak ich stabilności zwiększa ryzyko przyjęcia błędnych założeń, dlatego konieczna jest szczegółowa analiza i dekompozycja wymagań klienta w celu ograniczenia potencjalnych niezgodności.
4	Wymóg efektywnej współpracy zespołów o różnych specjalizacjach technicznych (Faza 2–3)	Konieczna jest ścisła współpraca między zespołami inżynierskimi (mechanika, elektronika, jakość, proces). Brak spójności w interpretacji lub przekazywaniu danych prowadzi do trudnych do wykrycia niezgodności na styku różnych obszarów systemu.
5	Punkty decyzyjne determinujące przejście do kolejnych faz projektu (Faza 3–4)	Formalne kamienie milowe zatwierdzające przejście do kolejnych etapów. Niewłaściwa decyzja skutkuje eskalacją niezgodności i zwiększeniem ryzyka niepowodzenia projektu w dalszych fazach.
6	Weryfikacja gotowości do produkcji seryjnej i dostaw (Faza 4–5)	Ostateczna ocena zgodności produktu i procesu z wymaganiami jakościowymi i funkcjonalnymi. Wykrycie niezgodności na tym etapie może skutkować odrzuceniem wyrobu przez OEM, opóźnieniem uruchomienia produkcji seryjnej oraz stratami finansowymi i wizerunkowymi przedsiębiorstwa.

W oparciu o kryteria z tabeli 2.2.7 przeprowadzono jakościową ocenę poszczególnych etapów planowania jakości, analizując ich podatność na występowanie niezgodności oraz wpływ na spójność całego procesu rozwoju produktu. W analizie uwzględniono różnice pomiędzy prostymi, jednofunkcyjnymi produktami o niewielkiej liczbie elementów i małej zmienności projektowej a produktami złożonymi, które charakteryzują się większą liczbą komponentów,

rozbudowaną strukturą funkcjonalną oraz koniecznością zapewnienia spójności działania wielu współpracujących podzespołów.

Tabela 2.2.8 odnosi się do modelu z rysunku 2.2.4 i wyjaśnia, dlaczego poszczególne etapy planowania jakości są uznawane za krytyczne. Podkreślono w niej, że te same etapy mogą mieć różne znaczenie w zależności od stopnia złożoności produktu. W przypadku produktów o niskim poziomie złożoności krytyczność wynika głównie z ryzyka błędnej interpretacji wymagań czy późnych decyzji projektowych, natomiast w produktach o wysokim poziomie złożoności rośnie znaczenie integracji poszczególnych części systemu, co zwiększa ryzyko wystąpienia niezgodności.

Opis zawarty w tabeli 2.2.8 wskazuje więc, że choć formalnie krytyczne etapy pozostają takie same, ich praktyczne znaczenie zmienia się w zależności od kontekstu projektu. Wskazuje to na potrzebę bardziej elastycznego podejścia do planowania jakości, szczególnie w przypadku produktów mechatronicznych, gdzie liczba powiązań pomiędzy elementami systemu jest znacznie większa niż w przypadku produktów konwencjonalnych.

Tabela 2.2.8. Uzasadnienie krytyczności poszczególnych etapów (odniesienie do modelu z rysunku 2.2.3) – opracowanie własne

Etap zgodny z modelem (rys. 2.2.3)	Uzasadnienie krytyczności	Kryteria spełnione (tabela 2.2.5)
Identyfikacja wymagań klienta (OEM)	Punkt wyjścia planowania jakości. Błędna interpretacja wymagań prowadzi do systemowych niezgodności i ryzyka utraty zgodności z CSR. W przypadku produktów złożonych (np. mechatronicznych) ryzyko wzrasta z uwagi na większą liczbę wymagań technicznych oraz konieczność zapewnienia spójności pomiędzy różnymi obszarami technicznymi.	1, 3
Analiza ryzyka (D-FMEA, P-FMEA)	Krytyczny etap oceny zagrożeń związanych z funkcją produktu i procesem jego wytwarzania. W produktach złożonych wymaga uwzględnienia interakcji pomiędzy komponentami mechanicznymi, elektronicznymi i hydraulicznymi, co zwiększa złożoność analizy.	2, 4
Budowa prototypu i walidacja koncepcji	Weryfikacja rzeczywistej wykonalności rozwiązania. Ewentualne niezgodności wykryte na tym etapie są kosztowne i trudne do wyeliminowania. W produktach złożonych dodatkowym wyzwaniem jest testowanie integracji różnych podsystemów.	2, 4
Zatwierdzenie koncepcji	Formalna decyzja strategiczna wpływająca na budżet, harmonogram, zapotrzebowanie na zasoby i zgodność z oczekiwaniami klienta. W przypadku produktów złożonych błędne decyzje mogą skutkować koniecznością kosztownej przebudowy wielu powiązanych elementów.	5
Walidacja produktu	Potwierdzenie, że wyrób spełnia wymagania jakościowe, funkcjonalne i regulacyjne. W produktach złożonych proces walidacji wymaga szerszego zakresu testów, obejmującego również interfejsy pomiędzy różnymi podsystemami.	1, 5
Walidacja procesu i przygotowanie PPAP	Sprawdzenie czy proces produkcyjny jest stabilny i zdolny do spełnienia wymagań. W przypadku produktów złożonych konieczne jest uwzględnienie większej liczby operacji, punktów kontrolnych i parametrów krytycznych.	2, 6
Zatwierdzenie produktu i procesu – PPAP	Końcowa ocena zgodności z wymaganiami klienta. Negatywna decyzja skutkuje wstrzymaniem dostaw i stratami operacyjnymi. W produktach złożonych ryzyko odrzutu jest wyższe z uwagi na większą liczbę potencjalnych źródeł niezgodności.	5, 6

Tabela 2.2.9 przedstawia porównanie realizacji krytycznych etapów planowania jakości dla produktów prostych i złożonych. Choć formalnie etapy te są identyczne, w przypadku produktów złożonych rośnie skala ryzyka, zakres wymaganej koordynacji oraz liczba czynników wpływających na ich prawidłowe wykonanie. Wymaga to stosowania bardziej szczegółowych analiz, szerszej wymiany informacji oraz ścisłego nadzoru nad każdym etapem procesu.

Tabela 2.2.9. Porównanie realizacji krytycznych etapów planowania jakości dla produktów prostych i złożonych (przykład: produkt mechatroniczny) - opracowanie własne

Etap (wg rys. 2.2.3)	Produkt prosty / jednofunkcyjny	Produkt złożony (np. mechatroniczny)
Identyfikacja wymagań klienta (OEM)	Ograniczona liczba wymagań, zwykle dotyczących jednego obszaru technicznego; mniejsze ryzyko rozbieżności interpretacyjnych.	Wymagania obejmują wiele obszarów technicznych (mechanika, elektronika, oprogramowanie), wysoka liczba powiązań i zależności; większe ryzyko błędnej interpretacji.
Analiza ryzyka (D-FMEA, P-FMEA)	Mniej możliwych przyczyn niezgodności, łatwiejsze przypisanie działań zapobiegawczych; krótszy proces analizy.	Złożona struktura produktu wymaga oceny powiązań pomiędzy podsystemami; konieczność iteracyjnych analiz i większej szczegółowości.
Budowa prototypu i walidacja koncepcji	Testy skupione głównie na funkcji podstawowej; krótszy czas weryfikacji.	Testy obejmują wiele funkcji oraz ich wzajemne oddziaływanie; konieczne równoległe testowanie różnych podsystemów.
Zatwierdzenie koncepcji	Decyzja strategiczna oparta na ograniczonej liczbie parametrów; mniejsze ryzyko efektu domina w przypadku zmian.	Decyzja dotyczy zintegrowanej architektury produktu (systemu); zmiana w jednym obszarze może wymagać przebudowy wielu powiązanych elementów.
Walidacja produktu	Zakres testów ograniczony do jednego obszaru technicznego; krótsze procedury.	Rozszerzone testy obejmujące wszystkie podsystemy; większa liczba punktów kontrolnych.
Walidacja procesu i przygotowanie PPAP	Stabilny proces o niewielkiej liczbie zmiennych krytycznych; mniej punktów kontroli.	Proces obejmuje wiele operacji, różnych technologii wytwarzania i parametrów krytycznych.
Zatwierdzenie produktu i procesu – PPAP	Stosunkowo niski poziom ryzyka niezatwierdzenia dokumentacji PPAP przy spełnieniu podstawowych wymagań.	Wyższe ryzyko niezatwierdzenia dokumentacji PPAP z uwagi na liczbę parametrów do spełnienia i złożoność wzajemnych powiązań.

Podsumowując, współczesne podejście do planowania jakości stanowi odpowiedź na rosnącą złożoność produktów oraz skracające się cykle rozwoju produktów. Kluczowym czynnikiem skuteczności i efektywności procesu planowania jakości nie jest jedynie spełnienie formalnych wymagań, lecz zdolność do adaptacyjnego reagowania na zmiany oraz integracja procesów projektowych i produkcyjnych w jeden spójny system obejmujący planowania jakości produktu i procesu. Warto podkreślić, że wymagania techniczne i normatywne zarówno dla produktów i procesów nie zawsze są w pełni tożsame z rzeczywistymi oczekiwaniami użytkownika końcowego – dlatego właściwie przeprowadzony proces planowania jakości produktu i procesu powinien prowadzić do ich powiązania i wzajemnego uzgodnienia.

2.3 Standardy normatywne i technologie cyfrowe w planowaniu jakości produktów i procesów produkcyjnych

Współczesne podejście do planowania jakości produktów i procesów nie może być skutecznie realizowane bez powiązania dwóch kluczowych obszarów: standardów normatywnych oraz technologii cyfrowych. Integracja tych filarów stanowi obecnie podstawowy warunek skuteczności i konsekwentnego wdrażania procedur planowania jakości oraz utrzymania wysokiego poziomu zgodności realizowanych działań z przyjętymi standardami – szczególnie istotne jest to w przypadku złożonych produktów, takich jak amortyzatory sterowane elektronicznie [117, 118].

Przez standardy normatywne rozumie się tu formalne dokumenty o charakterze normatywnym powszechnym lub branżowym – takie jak norma ISO 9001 (*International Organization for Standardization – Quality Management Systems*) czy IATF 16949 (*International Automotive Task Force – Automotive Quality Management System Standard*) – a także wytyczne stowarzyszeń branżowych, np. AIAG (*Automotive Industry Action Group*) oraz specyficzne wymagania klientów OEM (*Original Equipment Manufacturer*), znane jako CSR (*Customer-Specific Requirements*). Standardy te definiują minimalne wymagania dla organizacji w zakresie nadzoru, stosowanych narzędzi i dobrych praktyk związanych z jakością produktów i procesów. Stanowią one wspólną podstawę realizacji działań projakościowych, umożliwiają przeprowadzanie ocen i weryfikacji (np. w postaci audytów), a także zapewniają jednolite rozumienie kluczowych aspektów planowania jakości – zarówno w kontaktach z klientem, dostawcą, jak i w strukturach wewnętrznych organizacji [15- 95].

Technologie cyfrowe odnoszą się do rozwiązań informatycznych wspierających realizację powyższych standardów w praktyce przemysłowej. Obejmują one zarówno zintegrowane systemy klasy PLM (*Product Lifecycle Management*), QMS (*Quality Management System*) czy MES (*Manufacturing Execution System*), jak i dedykowane platformy do zarządzania instrumentacją planowania jakości – takimi jak: FMEA (*Failure Mode and Effects Analysis*), Control Plan, APQP (*Advanced Product Quality Planning*) czy PPAP (*Production Part Approval Process*). Technologie te umożliwiają automatyzację przepływu danych pomiędzy stosowanymi instrumentami planowania jakości (np. FMEA, plan kontroli, diagram przepływu procesu), zapewniają spójność i aktualność informacji w dokumentacji projektowej, umożliwiają bieżącą kontrolę wersji oraz pełną identyfikowalność zmian. Dzięki temu wspierają eliminację niespójności pomiędzy procesami, przyspieszają zatwierdzanie danych i umożliwiają szybsze podejmowanie decyzji inżynierskich – co bezpośrednio przekłada się na wzrost skuteczności i efektywności procesu planowania jakości oraz zmniejszenie ryzyka niezgodności w kolejnych etapach rozwoju produktu i procesu [119- 120].

W niniejszym podrozdziale scharakteryzowano, w jaki sposób standardy normatywne i technologie cyfrowe przyczyniają się do usprawnienia procesu planowania jakości, zwiększenia jego ustrukturyzowania (transparentności) oraz lepszego dostosowania do

wymagań i oczekiwań klienta. Szczególną uwagę poświęcono aspektom praktycznym (implementacyjnym) – tj. rzeczywistemu wpływowi tych rozwiązań na ograniczanie ryzyka, skracanie cykli decyzyjnych oraz redukcję niezgodności wynikających z błędów interpretacyjnych i braku spójności danych.

Wybór przedstawionych przykładów został celowo zawężony do rozwiązań stosowanych w obszarze rozwoju produktu i jego industrializacji, ponieważ to właśnie te etapy procesu planowania jakości – od koncepcji produktu, przez projektowanie, walidację, aż po przygotowanie do produkcji seryjnej – stanowiły główny przedmiot prac badawczo-wdrożeniowych prowadzonych w ramach niniejszej rozprawy doktorskiej. Takie podejście umożliwia rzetelną analizę wpływu wybranych instrumentów planowania jakości na efektywność i skuteczność procesu rozwoju i industrializacji w kontekście amortyzatorów sterowanych elektronicznie.

Cyfrowe planowanie jakości można zdefiniować jako wykorzystanie systemów informatycznych do zarządzania wszystkimi etapami projektowania i wdrażania oraz spełnienia wymagań jakości – od analizy wymagań, przez ocenę ryzyka, aż po planowanie i kontrolę procesów produkcyjnych. Takie podejście rozszerza możliwości tradycyjnych sposobów dokumentowania, oferując automatyczne nadzorowanie zmian, powiązanie danych w dokumentacji oraz bieżący dostęp do informacji, co ma kluczowe znaczenie w dynamicznym procesie rozwoju produktu i procesu [121- 122].

W ramach niniejszego opracowania zagadnienie cyfryzacji instrumentarium planowania jakości – czyli przejścia z tradycyjnych metod dokumentacyjnych na platformy informatyczne umożliwiające automatyczne powiązanie i synchronizację danych jakościowych – zostało przedstawione na przykładzie metody FMEA (Failure Mode and Effects Analysis) – wymaganego normatywnie i w związku z tym powszechnie stosowanego instrumentu oceny ryzyka w przemyśle motoryzacyjnym. Analiza ta, choć skoncentrowana na FMEA, ilustruje szerzej problematykę w tym, jak dobrać środowisko informatyczne do rzeczywistych potrzeb organizacji, charakterystyki projektu oraz złożoności produktu. Zastosowane podejście ma charakter modelowy – wnioski można z powodzeniem odnieść także do innych inżynierskich instrumentów planowania jakości: takich jak plan kontroli, diagram przebiegu procesu czy harmonogramy APQP [123- 124].

W praktyce środowiska informatyczne wspierające FMEA różnią się poziomem zaawansowania (Tabela 2.3.1): od prostych szablonów opracowanych w Excelu, przez aplikacje dedykowane, aż po rozbudowane, zintegrowane systemy do planowania jakości. Dobór odpowiedniego rozwiązania nie powinien być oparty wyłącznie na dostępnych funkcjach, lecz przede wszystkim na ich dopasowaniu do specyfiki projektu oraz gotowości organizacji do ich wdrożenia i efektywnego wykorzystania.

Tabela 2.3.1. Charakterystyka środowisk informatycznych do analizy FMEA według poziomu zaawansowania (opracowanie własne bazujące na [3W- 5W])

Poziom środowiska	Opis instrumentu	Przykłady rozwiązań	Zakres funkcji i ograniczenia
Poziom 1 PODSTAWOWY	Dokumenty tworzone ręcznie, bez wzajemnych powiązań	Formularz papierowy, Excel	Brak powiązań między funkcjami, przyczynami i działaniami kontrolnymi; dane wprowadzane ręcznie, bez możliwości walidacji; brak śledzenia zmian i wersji; wysokie ryzyko niespójności; brak obsługi współpracy zespołowej; narzędzie odpowiednie wyłącznie dla bardzo prostych analiz prowadzonych przez pojedynczego użytkownika.
Poziom 2 SZABLONOWY	Gotowe szablony z podstawową strukturą danych lub proste aplikacje	Excel z makrami, proste aplikacje- FMEA Studio	Proste aplikacje do analizy FMEA, często zintegrowane z arkuszami Excel lub podobnymi narzędziami. Umożliwiają tworzenie podstawowej struktury danych, edycję wielopoziomową i eksport raportów, lecz wymagają ręcznej synchronizacji i mają ograniczone możliwości pracy zespołowej. W wersjach bardziej zaawansowanych dostępne są relacyjne bazy danych, biblioteki usterek i podstawowa kontrola wersji, co czyni je przydatnymi przy analizach obejmujących więcej komponentów.
Poziom 3 ZINTEGROWANY	Zaawansowane oprogramowanie dedykowane do analizy ryzyka	PQ-FMEA, APIS IQ-Software, PLATO e1ns	Pełna integracja FMEA z dokumentacją APQP (Control Plan, Flowchart, itp.); współdzielona baza danych z uprawnieniami dostępu; wersjonowanie, śledzenie zmian (traceability), automatyczne powiązania danych; obsługa cyklu zatwierdzania i eskalacji; możliwość integracji z PLM/QMS; rozwiązanie skalowalne – może być stosowane zarówno w małych projektach, jak i w rozbudowanych programach rozwojowych oraz w środowiskach wielozakładowych.

Tabela powyżej klasyfikuje środowiska FMEA na trzech poziomach – od prostych dokumentów tworzonych ręcznie, z ograniczoną kontrolą wersji, po zintegrowane platformy umożliwiające synchronizację tak ważnymi danymi w zakresie produkcji jak: listą materiałową (BOM – *Bill of Materials*), planem kontroli (CP – *Control Plan*), diagramem przebiegu procesu (Flowchart – *Process Flowchart*) oraz systemami zarządzania cyklem życia produktu (PLM – *Product Lifecycle Management*) i zarządzania jakością (QMS – *Quality Management System*). Wskazuje ona, że wyższy poziom zaawansowania przekłada się na większą spójność danych, lepsze zarządzanie zmianą i możliwość pracy zespołowej, ale też rosnące koszty oraz wymagania techniczne i organizacyjne [3W- 5W].

W celu racjonalnej oceny przydatność danego środowiska, pomocne może być zastosowanie zestawu kryteriów funkcjonalnych (Tabela 2.3.2). Uwzględniają one takie aspekty jak: spójność danych, możliwość integracji, obsługę wersji, skalowalność, koszty wdrożenia i utrzymania oraz wymagania kompetencyjne względem użytkownika.

Tabela 2.3.2. Propozycja kryteriów oceny środowisk FMEA (opracowanie własne)

Kryterium	Opis
Skalowalność	Możliwość stosowania narzędzia w projektach o różnej złożoności
Spójność danych	Stopień kontroli nad powiązaniem między funkcjami, przyczynami, skutkami i działaniami
Możliwość integracji	Zdolność do połączenia z innymi narzędziami (BOM, CP, PLM, testy walidacyjne)
Obsługa wersji i zmian	Stopień automatyzacji zarządzania wersjami i historią modyfikacji
Ułatwienia dla zespołu	Wsparcie dla pracy zespołowej, komentowania, zatwierdzania
Koszty i dostępność	Całkowity koszt wdrożenia, licencji i utrzymania
Wymagania szkoleniowe	Czas i poziom trudności wdrożenia użytkowników

Powyższe (Tabela 2.3.2) umożliwia nie tylko porównanie dostępnych rozwiązań, ale przede wszystkim ich świadome dopasowanie do typu projektu, złożoności produktu oraz poziomu organizacyjnej dojrzałości w zakresie świadomości projakościowej. Inżynierskie instrumenty planowania jakości, które w jednej organizacji okażą się niezbędne, w innej może być zbyt obciążające – zarówno kosztowo, jak i operacyjnie [125- 126].

Wśród zalet charakteryzujących środowisko cyfrowych warto wymienić [3W- 5W]:

- spójną strukturę danych oraz automatyzację powiązań między dokumentami jakościowymi,
- możliwość dynamicznej aktualizacji treści w odpowiedzi na zmieniające się wymagania,
- lepszą identyfikowalność oraz zgodność z wymaganiami audytowymi i klientów OEM,
- wsparcie pracy zespołowej w środowisku rozproszonym – umożliwiające jednocześnie dostęp wielu użytkowników, kontrolę wersji i śledzenie zmian w zespołach rozproszonych geograficznie i funkcjonalnie.

Wdrożenie narzędzi cyfrowych **wiąże się również z pewnymi ograniczeniami** [3W- 5W]:

- kosztami licencji i utrzymania systemów oraz potrzeby ich integracji z istniejącą infrastrukturą IT (należy nadmienić, że wiele rozwiązań bazuje na płatnym dostępie do systemów będących własnością podmiotów oferujących ich funkcjonalność za stosowaną roczną licencyjną opłatą np. programy do oceny cyklu życia produktu),
- koniecznością przeszkolenia użytkowników i reorganizacji niektórych procesów,
- ryzykiem nadmiernej formalizacji – gdy narzędzie dominuje nad treścią merytoryczną.

Wnioski z przeprowadzonej analizy jednoznacznie wskazują, że skuteczność cyfrowego wsparcia procesu planowania jakości nie wynika wyłącznie z dostępności nowoczesnych technologii, lecz z ich właściwego dopasowania do specyfiki produktu, złożoności procesu oraz struktury organizacyjnej. Dla projektów o niewielkiej złożoności wystarczające mogą być nadal narzędzia oparte na prostych strukturach, takich jak arkusze Excel z makrami.

Jednak w przypadku produktów złożonych, realizowanych w rozproszonych i interdyscyplinarnych środowiskach, zastosowanie zintegrowanych rozwiązań cyfrowych staje się nie tylko korzystne, ale wręcz niezbędne – stanowi warunek zapewnienia spójności, przejrzystości i pełnej identyfikowalności danych jakościowych [127- 128].

Uzyskanie oczekiwanej skuteczności zastosowania narzędzi informatycznych wspierających nadzór nad spełnieniem wymagań jakościowych dla produktów i procesów, muszą działać w zgodzie z ramami określonymi przez uznane i globalnie stosowane normatywne standardy systemowe. W dalszej części dokonano charakterystyki, w jaki sposób wymagania normy takie jak ISO 9001, IATF 16949 oraz wymagania specyficzne klientów (CSR) stanowią fundament dla cyfrowego procesu planowania jakości, wzmacniając jego skuteczność i zgodność z oczekiwaniami branży motoryzacyjnej [129- 130, 1S- 2S, 6W].

Skuteczne wdrażanie rozwiązań informatycznych w obszarze planowania jakości wymaga ich zgodności także z obowiązującymi standardami branżowymi. Normy systemowe pełnią funkcję nie tylko regulacyjną, ale przede wszystkim określają strukturę dokumentacji, sposób nadzoru nad informacją oraz postulują przyjęcie pewnej logiki procesu planowania jakości w całym cyklu życia produktu [131- 132, 1S- 2S].

Standardy ISO 9001, IATF 16949 oraz Customer Specific Requirements (CSR) stanowią fundament, na którym budowane są rozwiązania informatyczne wsparcia procesu planowania jakości. Norma ISO 9001:2015 postuluje przyjęcie podejścia procesowego, zarządzania ryzykiem oraz spójną dokumentację jako podstawę standaryzacji działań i ciągłego doskonalenia procesów. IATF 16949:2016 rozwija te wymagania, dodając obowiązek stosowania podstawowych instrumentów (core tools) oraz zaostrzając wymagania dotyczące identyfikowalności danych i kontroli zmian. Wymagania CSR doprecyzowują sposób interpretacji wymagań systemowych w relacji z konkretnym producentem OEM [1S-9S, 6W].

W środowiskach informatycznych standardy te kształtują sposób zarządzania danymi jakościowymi. Zgodność z nimi oznacza w praktyce [133- 134]:

- możliwość śledzenia i weryfikacji informacji na każdym etapie planowania i zatwierdzania rozwoju produktu i procesu,
- zapewnienie spójności dokumentacji pomiędzy stosowanym instrumentarium jakościowymi (np. FMEA, Control Plan),
- wdrożenie mechanizmów formalnego zatwierdzania i udokumentowanej kontroli zmian.

Technologie cyfrowe wspierające proces planowania jakości, oferowane w ramach określonych wymagań przez ISO 9001, IATF 16949, zyskuje tym samym nie tylko techniczne, ale

i organizacyjne podstawy działania. Wdrożenie wymagań normatywnych wraz z wsparciem informatycznym umożliwiającą pełną identyfikowalność decyzji, danych wejściowych oraz wyników analiz jakościowych, co jest niezbędne w przedsiębiorstwach zorientowanych na zgodność, stabilność i ciągłe doskonalenie [135, 136].

Dodatkowo, zgodność z wymaganiami CSR ułatwia dopasowanie narzędzi informatycznych do rzeczywistych – często nieformalnych – oczekiwań klientów. Wymagania te mogą obejmować konkretne sposoby prowadzenia zatwierdzeń produktów i procesów, stosowanie zdefiniowanych systemów (np. Teamcenter Quality) czy raportowanie danych w określonych formatach. Narzędzia informatyczne, które wspierają takie praktyki, umożliwiają nie tylko spełnienie wymagań, ale również zwiększają wiarygodność organizacji w oczach klienta, wzmacniając transparentność oraz otwartość na weryfikację audytową [6W, 137]

Normy systemowe, takie jak ISO 9001, IATF 16949 oraz wymagania specyficzne klientów (CSR), wyznaczają ramy formalnej zgodności procesów i określają sposób gromadzenia, aktualizacji oraz udostępniania danych jakościowych dla procesów projektowo-produkcyjnych. Wymagają m.in. jednoznacznej identyfikacji i nadzorowania danych i informacji na każdym etapie cyklu życia produktu, pełnej kontroli wersji dokumentacji oraz utrzymania transparentnych zapisów potwierdzających zgodność z wymaganiami. W tym ujęciu technologie informatyczne planowania jakości stają się integralnym elementem wsparcia procesów nadzoru jakości, umożliwiającym bieżący monitoring procesów produkcyjnych, przejrzysty przepływ danych np. pochodzących z kontroli i szybkie reagowanie na zmieniające się oczekiwania klientów OEM [6W, 135].

Szczególną rolę odgrywają narzędzia informatyczne klasy Core Tools, dedykowane dla podstawowych instrumentów planowania jakości wykorzystywane w branży motoryzacyjnej: APQP, FMEA, MSA, SPC i PPAP. Współczesne wersje tych narzędzi dostępne są jako zaawansowane oprogramowania, które automatyzuje przepływ danych oraz umożliwiają synchroniczną aktualizację informacji pomiędzy powiązаныmi dokumentami jakościowymi. Kluczowe funkcje, takie jak automatyczna synchronizacja dokumentów FMEA, Control Plan i Flowchart, sprawdzanie spójności powiązań czy integracja z platformami klienta (np. ePPAP, Teamcenter), pozwalają opracowywać plany jakości przejrzyste i zgodne z wymaganiami branżowymi. Tak zorganizowane środowisko przyspiesza procesy zatwierdzeń, minimalizuje ryzyko operacyjne oraz umożliwia zespołom szybkie i rzetelne reagowanie na zmiany lub wymagania klientów OEM [138- 141].

2.4 Instrumentarium planowania jakości produktu i procesu oraz czynniki wpływające na jego skuteczność

Niniejszy rozdział przedstawia przegląd inżynierskiego instrumentarium planowania jakości – obejmującego metody, narzędzia i techniki – z uwzględnieniem ich roli w procesie rozwoju i industrializacji produktu, analizie ryzyka, walidacji rozwiązań technicznych oraz ocenie skuteczności i efektywności ich stosowania. Poniższa analiza dotyczy przede wszystkim

merytorycznego wymiaru inżynierskiego instrumentarium jakościowego, zasad ich doboru, sposobów implementacji oraz ograniczeń występujących w praktyce. Uwzględniono również znaczenie wskaźników skuteczności i efektywności w ocenie wykorzystania tych instrumentów oraz wpływ doświadczenia i dojrzałości zespołu na osiągnięte rezultaty.

Proces planowania jakości, szczególnie w projektach obejmujących produkty o złożonej strukturze technicznej, wymaga świadomego doboru rozwiązań wspierających proces decyzyjny w obszarze inżynierskim. Różnorodność dostępnych metod i narzędzi, a także ich zróżnicowany poziom formalizacji i zakres zastosowania, powodują, że kluczowe staje się ich systematyczne uporządkowanie pod kątem pełnionych funkcji, zasięgu działania oraz roli w strukturze projektu. Takie podejście umożliwia spójne łączenie działań technicznych z monitorowaniem rezultatów, a także ocenę, w jakim stopniu przyjęte rozwiązania faktycznie wspierają realizację celów projektowych [142- 144].

Na potrzeby analizy opracowano autorskie zestawienie (Tabela 2.4.1), rozwijające koncepcję przedstawioną wcześniej na rysunku 2.2.4 gdzie model przedstawia kluczowe fazy procesu planowania jakości oraz ich wpływ na poziom ryzyka w projekcie, z wyraźnym rozróżnieniem działań związanych z rozwojem produktu i projektowaniem procesu produkcyjnego. Uwzględniono w nim także krytyczne punkty decyzyjne o znaczeniu technicznym i organizacyjnym – obejmujące m.in. koordynację działań pomiędzy zespołami, zarządzanie zasobami oraz zapewnienie zgodności z wymaganiami klienta. Stanowi on podstawę do przyporządkowania instrumentów planowania jakości do odpowiednich faz realizacji projektu.

Tabela 2.4.1. Przykłady instrumentów planowania jakości przypisanych do poszczególnych etapów procesu planowania jakości (opracowanie własne bazujące na [145- 146])

Etapy procesu	Cel zastosowania	Przykładowe instrumentarium
Identyfikacja wymagań klienta (OEM)	Przełożenie wymagań klienta na mierzalne kryteria techniczne stanowiące podstawę działań projektowych	Lista wymagań, QFD (Quality Function Deployment)
Analiza i dekompozycja wymagań OEM	Rozbicie wymagań na poziomy funkcjonalne i konstrukcyjne w celu przypisania odpowiedzialności i ułatwienia planowania jakości	Matryce wymagań, analiza funkcji
Określenie celów i ograniczeń projektu	Zdefiniowanie kluczowych celów technicznych, kosztowych i czasowych oraz ograniczeń dla zespołu projektowego	Checklisty projektowe (arkusze kontrolne projektu), analiza SWOT
Projektowanie architektury produktu/systemu	Opracowanie koncepcji architektury produktu z podziałem na moduły i interfejsy w celu wsparcia analizy ryzyka	Diagramy blokowe, modele systemowe

Analiza ryzyka	Identyfikacja zagrożeń projektowych i punktów krytycznych dla bezpieczeństwa, funkcjonalności i niezawodności	DFMEA (Design Failure Mode and Effects Analysis)
Projektowanie produktu	Opracowanie szczegółowej dokumentacji konstrukcyjnej zgodnej z wymaganiami projektowymi i analizą ryzyka	CAD (Computer-Aided Design), DFMA (Design for Manufacturing and Assembly), CAE (Computer-Aided Engineering)
Symulacje i optymalizacja	Zweryfikowanie i zoptymalizowanie konstrukcji w celu ograniczenia liczby iteracji prototypów fizycznych	CAE, analiza tolerancji
Budowa prototypu i walidacja koncepcji	Weryfikacja działania prototypu i ocena jego zgodności z wymaganiami projektowymi	Plan walidacji, testy funkcjonalne
Optymalizacja parametrów i korekty projektowe	Wprowadzenie poprawek konstrukcyjnych i optymalizacja parametrów w celu spełnienia wymagań funkcjonalnych	DOE (Design of Experiments), analiza danych testowych
Zatwierdzenie koncepcji	Podjęcie decyzji o przejściu do kolejnej fazy i zatwierdzenie projektu do dalszych testów	Checklisty, macierze decyzji
Projekt i rozwój procesu	Opracowanie procesu produkcyjnego z uwzględnieniem wymagań produktu i klienta	PFMEA (Process Failure Mode and Effects Analysis), Flowchart
Testowanie i optymalizacja koncepcji procesu	Sprawdzenie wydajności i jakości procesu oraz identyfikacja usprawnień i ograniczeń	DOE, testy procesu
Walidacja produktu	Sprawdzenie zgodności produktu z wymaganiami funkcjonalnymi i jakościowymi w warunkach rzeczywistych	Plan walidacji
Walidacja procesu i przygotowanie PPAP	Potwierdzenie zdolności procesu do stabilnej i powtarzalnej produkcji	Plan prób, Control Plan
Zatwierdzenie produktu i procesu – PPAP	Formalne zatwierdzenie przez klienta kompletu dokumentacji produktu i procesu	PPAP, checklisty zatwierdzeniowe
Zatwierdzenie produktu	Ostateczne potwierdzenie zgodności produktu z wymaganiami klienta	Raporty zgodności, CP (Control Plan)
Przekazanie do produkcji	Formalne rozpoczęcie realizacji seryjnych zamówień klienta	Run@Rate (Próba potwierdzająca zdolność produkcyjną), checklisty wdrożeniowe

Zestawienie w tabeli 2.4.1 przedstawia pełny kontekst zastosowania poszczególnych inżynierskich instrumentów planowania jakości – od identyfikacji wymagań klienta, przez analizę ryzyka i projektowanie, aż po walidację oraz zatwierdzenie produktu i procesu. Powiązanie instrumentów z odpowiednimi danymi wejściowymi, wyjściowymi oraz jasno określonym celem ich stosowania umożliwia świadome zarządzanie ryzykiem, utrzymanie spójności dokumentacji dla produktu i procesu, efektywne planowanie działań w kolejnych fazach rozwoju oraz industrializacji produktu [142, 147].

Takie podejście zapewnia kompleksowe ujęcie procesu planowania jakości produktu i procesu – od definiowania wymagań po przekazanie produktu do produkcji seryjnej. Integracja wykorzystywanych instrumentów planowania jakości w logiczny łańcuch powiązań oraz ich umiejscowienie w konkretnych fazach realizacji projektu zwiększa przewidywalność działań, ułatwia identyfikację źródeł ryzyka i przyspiesza reakcję na pojawiające się niezgodności. W rezultacie możliwe jest nie tylko skuteczniejsze planowanie jakości, lecz także optymalizacja przebiegu prac rozwojowych i wdrożeniowych, co bezpośrednio przekłada się na efektywność całego procesu – skrócenie czasu jego trwania [148].

W celu lepszego zrozumienia roli poszczególnych instrumentów planowania jakości niezbędne jest jednak ich systematyczne uporządkowanie. W dostępnej literaturze zarówno naukowej, jak i branżowej oraz praktyce przemysłowej przyjmuje się trójstopniowe podejście do instrumentarium jakościowego, obejmujące [149- 152]:

- **Metody** – szerokie, strategiczne podejścia obejmujące spójny zestaw zasad, procesów i narzędzi, stosowane do całościowego planowania, monitorowania i doskonalenia jakości w skali całej organizacji lub projektu. Obejmują wszystkie fazy cyklu życia produktu – od analizy potrzeb klienta, przez projektowanie, produkcję, aż po obsługę posprzedażną. Przykłady: *Total Quality Management*, *Six Sigma*, *Failure Mode and Effects Analysis – FMEA*.
- **Narzędzia** – jasno zdefiniowane, powtarzalne procedury lub modele służące do systematycznej analizy, identyfikacji i kontroli konkretnych obszarów jakości (np. ryzyk, wymagań, parametrów procesu). Stosowane zazwyczaj na poziomie projektu lub procesu, wspierają realizację zadań, przykłady: *Quality Function Deployment – QFD*, diagram Ishikawy, 5 Why.
- **Techniki** – proste, operacyjne środki pracy wykorzystywane przez zespoły do szybkiego rozwiązywania niezgodności, usprawniania komunikacji i porządkowania informacji. Są łatwe do wdrożenia i nie wymagają skomplikowanych procedur, dzięki czemu sprawdzają się w codziennych działaniach operacyjnych, przykład: check listy (listy kontrolne).

Z punktu widzenia procesu planowania jakości istotne jest jednak nie tylko rozróżnienie między powyższymi metodami, narzędziami i technikami, lecz także zrozumienie ich wzajemnych zależności oraz adekwatnego umiejscowienia względem wykorzystania ich w procesie decyzyjnym, w jakim są stosowane w projekcie. Wynika to z faktu, że skuteczność danego instrumentu jakościowego nie zależy wyłącznie od jego formalnej poprawności czy zgodności

ze standardami normatywnymi czy branżowymi, lecz przede wszystkim od kontekstu jego użycia – charakteru procesu, celu działania oraz rodzaju decyzji, do których podejmowania jest uprawniony zespół w danym momencie realizacji projektu [153- 154].

W związku z powyższym zaproponowano klasyfikację opartą na trzech poziomach działalności przedsiębiorstw [155- 157]:

- Na **poziomie strategicznym** znajdują się narzędzia i metody kształtujące długofalowe kierunki działania organizacji w obszarze jakości. Obejmują one np. systemy zarządzania jakością (ISO 9001, IATF 16949), modele doskonalenia procesów (np. Six Sigma, Lean), a także narzędzia oceny dojrzałości procesów i wyznaczania celów jakościowych. Ich głównym zadaniem jest tworzenie kultury organizacyjnej opartej na prewencji, standaryzacji i ciągłym doskonaleniu.
- Na **poziomie taktycznym** narzędzia wspierają planowanie i ocenę rozwiązań technicznych – zarówno na poziomie produktu, jak i procesu. Do tej grupy należą m.in. FMEA, QFD, SPC czy DOE, które pozwalają na identyfikację i ocenę ryzyk, przełożenie wymagań klienta na parametry techniczne, optymalizację procesów oraz monitorowanie ich stabilności. Ich zastosowanie jest kluczowe na etapie koncepcji, projektowania oraz walidacji rozwiązań – a więc w obszarach, gdzie decyzje mają istotny wpływ na jakość końcowego produktu i możliwość jego zatwierdzenia przez klienta.
- Na **poziomie operacyjnym** wykorzystywane są techniki wspierające działania bieżące, codzienną kontrolę jakości oraz współpracę w zespołach inżynierskich. Należą do nich narzędzia wizualizacji i analizy niezgodności, takie jak diagram Ishikawy, 5Why, Poka-Yoke czy checklisty audytowe. Ich celem jest identyfikacja przyczyn źródłowych, standaryzacja praktyk operacyjnych oraz zapewnienie powtarzalności działań prowadzącej do uzyskiwania spójnych, zgodnych z wymaganiami wyników.

Zaproponowane powyżej wielopoziomowe podejście umożliwia świadome zarządzanie inżynierskim instrumentarium jakościowym, dopasowane do charakterystyki projektu, zakresu odpowiedzialności i struktury zespołów. W projekcie obejmującym rozwój i industrializację produktu kluczowe znaczenie ma koordynacja działań na różnych poziomach – od strategicznego planowania po wykonawczą kontrolę jakości. Aby jednak takie podejście było skuteczne, konieczne jest nie tylko prawidłowe dobranie i zintegrowanie stosowanego instrumentarium jakościowego, ale również bieżące monitorowanie efektów ich stosowania. W tym celu wykorzystuje się system wskaźników zarówno skuteczności i efektywności, które pozwalają obiektywnie ocenić, w jakim stopniu instrumenty jakościowe wspierają realizację celów projektu, redukują ryzyko oraz poprawiają spójność procesów w poszczególnych fazach rozwoju produktu i procesu [157- 159].

Skuteczność i efektywność instrumentów planowania jakości można oceniać zarówno przy użyciu danych ilościowych, jak i danych jakościowych. Dane ilościowe – takie jak ilość niezgodności wykrytych w poszczególnych fazach realizacji projektu, liczba wprowadzanych zmian technicznych w późnych etapach realizacji projektu czy średni czas zatwierdzania

dokumentacji – oferują precyzyjne, łatwe do porównania wartości, umożliwiające śledzenie trendów w dłuższym okresie. Ich zaletą jest obiektywność, jednak wadą może być ryzyko nadmiernego uproszczenia złożonych zjawisk oraz nieuwzględnianie kontekstu, w jakim dane powstały. Dane jakościowe – obejmujące m.in. oceny zgodności dokumentacji z wymaganiami, spójność przepływu informacji pomiędzy zespołami, jakość raportów z audytów czy kompletność działań korygujących – pozwalają uchwycić czynniki niezauważalne w statystykach ilościowych, lecz mogą być trudniejsze do porównania i wymagają interpretacji przez osoby posiadające doświadczenie w zarządzaniu projektami oraz planowaniu jakości [160- 163].

Kluczowe jest prawidłowe zdefiniowanie wskaźników, tak aby mierzyły one rzeczywiste cele projektu, a nie jedynie łatwo dostępne parametry, w sposób powierzchowny, bez krytycznej analizy danych. Błędny dobór lub nieprecyzyjne określenie KPI może prowadzić do mylnych wniosków – np. uznania projektu za skuteczny pomimo niewykrycia istotnych ryzyk w początkowych fazach. Może też skutkować koncentrowaniem się zespołów na poprawie wartości liczbowych kosztem faktycznej jakości produktu. Konsekwencją niepoprawnie zdefiniowanych wskaźników bywa również brak reakcji na niezgodności, które nie są objęte monitorowaniem, choć mają istotny wpływ na przebieg projektu. Dlatego proces definiowania KPI powinien obejmować ocenę ich adekwatności do celów projektu, okresową weryfikację ich przydatności w kontekście osiągniętych rezultatów oraz wprowadzanie korekt w odpowiedzi na zmieniające się warunki projektowe, wymagania klienta i wyniki dotychczasowych pomiarów [164- 165].

Istotnym elementem wpływającym na skuteczność procesu planowania jakości jest doświadczenie i dojrzałość zespołu w pracy z instrumentami jakościowymi. Nawet najlepiej zaprojektowany system wskaźników i stosowanie wybranego inżynierskiego instrumentarium nie przyniosą oczekiwanych efektów, jeśli osoby odpowiedzialne za jego realizację nie będą potrafiły właściwie interpretować danych, identyfikować odchyłeń oraz podejmować na tej podstawie trafnych decyzji. Szczegółowość i stopień sformalizowania inżynierskiego instrumentarium planowania jakości powinno być dostosowane do poziomu zaawansowania zespołu – w przypadku zespołów nowych lub mniej doświadczonych większy nacisk warto położyć na jasno zdefiniowane procedury, szczegółowe instrukcje i częstsze punkty kontrolne, natomiast w zespołach o wysokim poziomie świadomości można zwiększać autonomię, skracać formalne cykle raportowania i wykorzystywać instrumenty w sposób bardziej elastyczny. Kluczową rolę odgrywają tu działania rozwojowe – szkolenia, certyfikacje branżowe, warsztaty praktyczne czy system mentoringu – które nie tylko podnoszą kompetencje techniczne, ale również kształtują kulturę jakości w organizacji. W efekcie zespoły osiągają wyższą samodzielność w rozwiązywaniu niezgodności i lepszą spójność w realizacji celów projektowych [166- 167].

Podsumowując, skuteczność planowania jakości w złożonych projektach zależy nie tylko od doboru stosowanych inżynierskich instrumentów, ale także od sposobu ich implementacji, monitorowania i doskonalenia w oparciu o rzetelnie zdefiniowane wskaźniki skuteczności

i efektywności. Ich prawidłowe określenie i regularna weryfikacja pozwalają utrzymać spójność realizowanych działań, minimalizować ryzyko błędnej interpretacji danych oraz szybciej reagować na odchylenia. Równie istotne jest dopasowanie szczegółowości i stopnia sformalizowania instrumentarium do poziomu doświadczenia zespołu – tak, aby wspierały one proces decyzyjny, a nie go spowalniały. Dojrzałe zespoły pracownicze, potrafiące elastycznie adaptować instrumenty jakościowe do specyfiki projektu, w połączeniu z rozwijaniem kultury ciągłego doskonalenia, stanowią kluczowy czynnik przesądzający o tym, czy proces planowania jakości w sposób rzeczowy przekłada się na osiągnięcie założonych celów technologicznych, terminowych i jakościowych [168- 169].

2.5 Luka badawcza i uzasadnienie podjęcia tematyki pracy

Współczesne podejścia do planowania jakości opierają się na powszechnie stosowanym zestawie instrumentów jakościowych – obejmujących metody, narzędzia i techniki – oraz powiązanych z nimi standardów o znaczeniu globalnym i branżowych, których skuteczność została wielokrotnie potwierdzona w literaturze i praktyce przemysłowej. Stanowią one fundament działań wspierających rozwój produktu, od definiowania wymagań po jego walidację i przygotowanie do produkcji seryjnej [170].

Doświadczenia z realizowanych projektów wdrożeniowych wskazują jednak, że skuteczność i efektywność tych rozwiązań może być ograniczona, jeśli nie są one odpowiednio dopasowane do specyfiki procesu rozwoju produktu oraz właściwie zintegrowane z harmonogramem i zakresem prac projektowych. W wielu przypadkach trudności wynikają nie z braku samych instrumentów, lecz z niewłaściwego momentu lub sposobu ich zastosowania, niedostatecznej synchronizacji działań oraz braku spójnych zasad ich wykorzystania w kolejnych fazach projektu (w odniesieniu do zastosowania iteracyjnego), a także braku dostosowania ich do specyfiki produktu i procesu.

Celem niniejszego podrozdziału jest identyfikacja kluczowych luk badawczych, które wskazują na brak pełnego wykorzystania potencjału inżynierskiego instrumentarium planowania jakości w procesach rozwoju produktu i procesu. Każda z luk została sformułowana w oparciu o obserwacje z praktycznej realizacji projektów oraz analizę ograniczeń opisanych w literaturze.

LUKA 1

Brak analiz dotyczących znaczenia ewolucji instrumentów planowania jakości w procesie rozwoju i industrializacji produktu.

Ewolucja instrumentarium planowania jakości jest nieunikniona w warunkach szybko zmieniającego się otoczenia projektowego. Wpływają na nią m.in.: rosnąca złożoność konstrukcji i architektury produktów, skracanie cykli rozwojowych, coraz wyższe wymagania klientów i instytucji regulacyjnych, postępująca cyfryzacja procesów oraz konieczność koordynacji prac interdyscyplinarnych zespołów działających w różnych lokalizacjach. Każdy z tych czynników generuje potrzebę dostosowywania stosowanego instrumentarium – od

sposobu pozyskiwania, zapisu i analizy danych, poprzez mechanizmy ich aktualizacji, aż po logikę wykorzystania wyników w procesach decyzyjnych.

Dotychczasowe publikacje naukowe i dostępne materiały branżowe skupiają się głównie na modelowym opisie zasad działania oraz możliwości poszczególnych instrumentów (np. FMEA, QFD, Control Plan, PPAP). Brakuje w nich szczegółowych analiz wyjaśniających, jakie czynniki w praktyce powodują lub wymuszają modyfikacje danego instrumentu oraz w jaki sposób te zmiany wpływają na ich skuteczność.

LUKA 2

Brak weryfikacji skuteczności instrumentów planowania jakości w ocenie kompletności i poprawności realizacji działań podczas przechodzenia przez kolejne fazy APQP.

W strukturze APQP każda faza rozwoju i industrializacji produktu obejmuje zdefiniowany zestaw działań, których pełna i prawidłowa realizacja stanowi warunek przejścia do kolejnej fazy. Instrumenty planowania jakości powinny w tym procesie pełnić rolę przejrzystego i ustandaryzowanego mechanizmu oceny, umożliwiającego potwierdzenie, że wszystkie wymagane aktywności zostały zrealizowane, a ich wyniki spełniają zarówno wymagania klienta, jak i założenia projektowe.

Dostępne opracowania skupiają się głównie na ogólnym opisie stosowania poszczególnych instrumentów w ramach określonych działań, pomijając analizę sposobów ich dostosowywania do charakterystyki i złożoności rozwijanego produktu. Brakuje w dostępnej literaturze przedstawionych wyników badań, które pokazywałyby, w jaki sposób proces doboru i konfiguracji instrumentarium jest modyfikowany w zależności od specyfiki produktu – w tym poziomu innowacyjności, stopnia integracji podsystemów, wymagań w zakresie walidacji oraz dynamiki zmian projektowych.

Brak odpowiednich mechanizmów weryfikacji niesie ryzyko przechodzenia do realizacji następnej fazy APQP z niedomkniętymi zagadnieniami z fazy poprzedniej. Może to prowadzić do przenoszenia niezgodności projektowych na późniejsze etapy, eskalacji kosztów wprowadzania zmian, wydłużenia czasu realizacji oraz obniżenia jakości końcowego produktu. W skrajnych przypadkach skutkuje to koniecznością powrotu do wcześniejszych faz procesu, co znacząco zmniejsza efektywność całego cyklu rozwoju.

LUKA 3

Brak danych dotyczące badania skuteczności instrumentów planowania jakości w procesie weryfikacji poprawności i spójności dokumentacji technicznej.

Dokumentacja techniczna jest podstawowym nośnikiem wiedzy konstrukcyjnej i technologicznej w procesie rozwoju i industrializacji produktu. Jej kompletność, jednoznaczność i spójność stanowią fundament zapewnienia zgodności projektowanych rozwiązań z wymaganiami technicznymi, eliminacji błędów konstrukcyjnych oraz utrzymania integralności danych w całym cyklu rozwoju produktu. Brak precyzyjnych, empirycznie zweryfikowanych metod oceny jakości dokumentacji powoduje ryzyko powstawania

rozbieżności, które mogą prowadzić do kosztownych korekt i opóźnień harmonogramu realizacji projektu.

W szczególności dotyczy to dokumentacji tworzonej i zarządzanej w środowiskach CAD oraz GPDM (Global Product Data Management), obejmującej m.in. modele 3D, rysunki 2D oraz struktury produktu (BOM). Kluczowe znaczenie ma tu zapewnienie pełnej zgodności pomiędzy modelem 3D a rysunkiem 2D, spójności z wewnętrznymi standardami CAD oraz zgodności dokumentacji z wymaganiami klienta. Brakuje jednak opublikowanych badań oceniających skuteczność stosowanych w tym obszarze instrumentów planowania jakości, w tym procedur i metod weryfikacyjnych, które gwarantowałyby spójność oraz kompletność dokumentacji na każdym etapie rozwoju produktu.

Przedstawione powyżej luki badawcze stanowią punkt wyjścia do zdefiniowania celów badawczych niniejszej pracy. Każda z nich wskazuje na istotny obszar, w którym aktualny stan wiedzy i praktyki inżynierskiej jest niewystarczający, co utrudnia skuteczne planowanie jakości w złożonych projektach produktowych. Co istotne, analiza luk nie prowadzi do jednoznacznego wniosku o konieczności opracowania całkowicie nowych narzędzi jakościowych. Zidentyfikowane problemy wskazują raczej na potrzebę ich krytycznej analizy ze względu na ich adaptację, modyfikację sposobu stosowania oraz lepszego dopasowania do dynamiki zmian i złożoności współczesnych projektów.

W niektórych sytuacjach konieczne jest uzupełnienie istniejących instrumentów o dodatkowe elementy umożliwiające lepszą weryfikację i integrację działań. W projektach o szczególnie wysokich wymaganiach może to oznaczać opracowanie specjalnie dedykowanych rozwiązań. Głównym celem jest podniesienie skuteczności procesu planowania jakości poprzez takie dopasowanie metod i narzędzi, aby były ściśle związane z realiami projektu, jego cyklem życia, rodzajem rozwijanego produktu i poziomem doświadczenia zespołu.

W rozdziale 3.1 każda z przedstawionych luk badawczych została powiązana z odpowiednim pytaniem badawczym oraz hipotezą główną.

3. Badania własne

Niniejszy rozdział prezentuje część badawczą rozprawy, w której skoncentrowano się na praktycznej weryfikacji przyjętych założeń dotyczących usprawnienia procesu rozwoju i industrializacji amortyzatorów sterowanych elektronicznie. W pierwszej kolejności przedstawiono cele i hipotezy badawcze, a następnie charakterystykę produktu oraz powiązanego z nim procesu, co pozwala lepiej zrozumieć specyfikę obszaru badań. Kolejne fragmenty rozdziału dotyczą diagnozy stanu wyjściowego i identyfikacji najczęściej występujących niezgodności, a także określenia ograniczeń, które mogły mieć wpływ na przebieg i interpretację wyników. Istotnym elementem jest również opis przyjętej metodyki badawczej oraz etapów realizacji prac, które wyznaczyły spójny sposób postępowania.

Na tej podstawie zaprezentowano projektowanie i wdrożenie trzech autorskich instrumentów planowania jakości: *Design Review*, *Problem Definition Tool* oraz *Technical Review*. Każde z tych narzędzi zostało opisane pod kątem celu zastosowania, zasad funkcjonowania oraz miejsca w strukturze procesu planowania jakości. W ten sposób rozdział trzeci stanowi nie tylko dokumentację przebiegu badań, lecz także punkt wyjścia do dalszej analizy ich skuteczności, zaprezentowanej w kolejnym rozdziale.

3.1. Cele i hipoteza badań oraz założenia badawcze

Niniejszy rozdział systematyzuje cele badawcze, hipotezę oraz pytania badawcze, które wynikają z analizy aktualnego stanu wiedzy i identyfikacji trzech kluczowych luk badawczych w obszarze planowania jakości w procesach rozwoju i industrializacji produktu.

Zidentyfikowane luki badawcze stanowią podstawę do sformułowania celów badawczych oraz hipotezy badań. Ich określenie pozwala na powiązanie aspektów teoretycznych z praktycznymi potrzebami przemysłu motoryzacyjnego, w którym złożoność systemów mechatronicznych – takich jak amortyzatory sterowane elektronicznie – wymaga adaptacji istniejących inżynierskich instrumentów planowania jakości lub opracowania nowych, wspierających skuteczność i efektywność realizowanych procesów.

Cel główny i cele szczegółowe

Głównym celem badawczym niniejszej rozprawy jest ocena skuteczności wdrożenia wybranych autorskich inżynierskich instrumentów planowania jakości w procesie rozwoju oraz industrializacji nowoczesnych systemów mechatronicznych, ze szczególnym uwzględnieniem ich wpływu na poprawę skuteczności procesu rozwoju i industrializacji produktu. Cel ten został sformułowany w odpowiedzi na praktyczne potrzeby przemysłu motoryzacyjnego, gdzie rosnąca złożoność systemów mechatronicznych wymaga nowych podejść metodologicznych wykraczających poza tradycyjne ramy planowania jakości. Empiryczna weryfikacja tego celu została przeprowadzona na przykładzie procesu rozwoju i industrializacji amortyzatorów sterowanych elektronicznie, które stanowią reprezentatywny przykład produktów

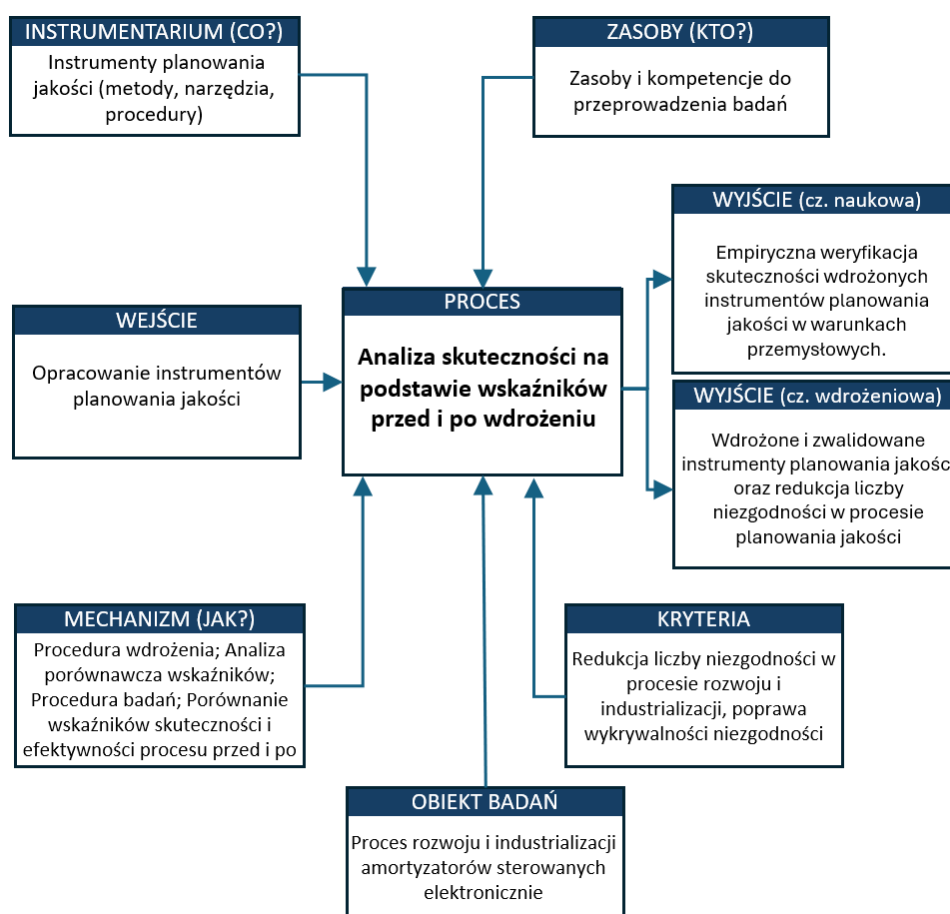
mechatronicznych- współczesnych systemów łączących różnorodne komponenty funkcjonalne w jedną spójną całość.

Realizacja celu głównego została usystematyzowana poprzez sformułowanie trzech celów szczegółowych, które bezpośrednio korespondują z zidentyfikowanymi lukami badawczymi oraz etapami procesu badawczego.

Hipoteza badawcza

Hipotezą badawczą niniejszej rozprawy jest założenie, że dopasowanie i wdrożenie wybranych instrumentów planowania jakości ma istotny wpływ na poprawę skuteczności i efektywności procesu rozwoju oraz industrializacji nowoczesnych systemów mechatronicznych.

Hipoteza ta została sformułowana na podstawie przeglądu literatury przedmiotu oraz analizy praktycznych problemów występujących w procesach rozwoju systemów mechatronicznych w przemyśle motoryzacyjnym. Jej podstawę teoretyczną stanowi założenie, że tradycyjne metodologie planowania jakości, opracowane z myślą o konwencjonalnych produktach mechanicznych, nie uwzględniają w wystarczającym stopniu specyfiki systemów integrujących różne obszary techniczne i wymagają adaptacji do ich interdyscyplinarnego charakteru.



Rysunek 3.1.1 Dekompozycja hipotezy badawczej w formie diagramu żółwia (opracowanie własne)

Rysunek 3.1.1 przedstawia dekompozycję hipotezy głównej w formie diagramu żółwia. Dekompozycja identyfikuje kluczowe komponenty procesu planowania jakości oraz mechanizmy ich wpływu na skuteczność i efektywność działań rozwojowych. Instrumentarium planowania jakości obejmuje autorskie narzędzia dostosowane do specyfiki systemów mechatronicznych, natomiast zasoby i kompetencje skoncentrowane są wokół interdyscyplinarnych zespołów projektowych, posiadających wiedzę z zakresu mechaniki, elektroniki i hydrauliki.

Mechanizm działania opiera się na procedurze wdrożeniowej oraz analizie porównawczej wskaźników przed i po implementacji instrumentów. Kryteriami oceny są m.in. redukcja liczby niezgodności, poprawa wykrywalności niezgodności oraz wzrost spójności dokumentacji projektowej. Proces opiera się na systematycznej ocenie skuteczności i efektywności działań, w oparciu o zdefiniowane wskaźniki jakościowe i ilościowe.

Rezultaty badań mają zarówno charakter wdrożeniowy, przejawiający się w redukcji liczby niezgodności, jak i naukowy, obejmujący identyfikację oraz opis aspektów poznawczych związanych z analizą skuteczności wdrażania instrumentów planowania jakości.

Pytania badawcze

Weryfikację hipotezy badawczej przeprowadzono na podstawie czterech pytań badawczych, które odnoszą się do kluczowych aspektów analizowanego problemu i wspierają interpretację uzyskanych wyników empirycznych. Pytania badawcze zostały sformułowane w sposób umożliwiający ich obiektywną weryfikację poprzez analizę danych ilościowych oraz jakościowych zebranych w trakcie realizacji projektu badawczego.

Tabela 3.1.1 przedstawia powiązania pomiędzy celami szczegółowymi, pytaniami badawczymi oraz kluczowymi wskaźnikami ich weryfikacji. Zestawienie to obrazuje logikę procesu badawczego, wskazując w jaki sposób poszczególne cele przekładają się na pytania badawcze oraz jakie mierniki ilościowe i jakościowe zostały przyjęte do ich empirycznej oceny.

Tabela 3.1.1. Zestawienie celów badawczych – pytań badawczych – wskaźniki (opracowanie własne)

Cel szczegółowy	Pytanie badawcze	Kluczowe wskaźniki weryfikacji
C1: Identyfikacja i analiza niezgodności w procesach rozwoju i industrializacji oraz opracowanie kategorii niezgodności dostosowanych do specyfiki badanych produktów.	P1: Czy istnieje różnica w rozkładzie kategorii niezgodności dla produktów konwencjonalnych i mechatronicznych dla poszczególnych faz planowania jakości?	Liczba niezgodności, rozkład kategorii niezgodności
C2: Implementacja i walidacja autorskich instrumentów planowania jakości, zaprojektowanych w odpowiedzi na zidentyfikowane problemy związane z kompletnością dokumentacji projektowej, oceną spełnienia wymagań oraz systematyzacją procesu identyfikacji i definiowania niezgodności.	P2: Jak implementacja autorskich instrumentów planowania jakości przyczynia się do poprawy kompletności dokumentacji projektowej, oceną spełnienia wymagań oraz systematyzacją procesu identyfikacji i definiowania niezgodności?	Liczba niezgodności, rozkład kategorii niezgodności
C3: Analiza rozkładu poszczególnych kategorii niezgodności i średniej wartości liczby eskalacji dla poszczególnych faz procesu rozwoju i industrializacji, w celu wskazania dominujących kategorii oraz oceny skuteczności zastosowanych instrumentów planowania jakości.	P3: Czy istnieje różnica w rozkładzie liczby niezgodności dla produktów mechatronicznych dla poszczególnych faz planowania jakości po wdrożeniu opracowanych rozwiązań? P4: Czy wdrożenie opracowanych instrumentów planowania jakości wpłynęło na zmianę rozkładu kategorii niezgodności?	Liczba niezgodności, rozkład kategorii niezgodności

3.2. Charakterystyka produktu i procesu

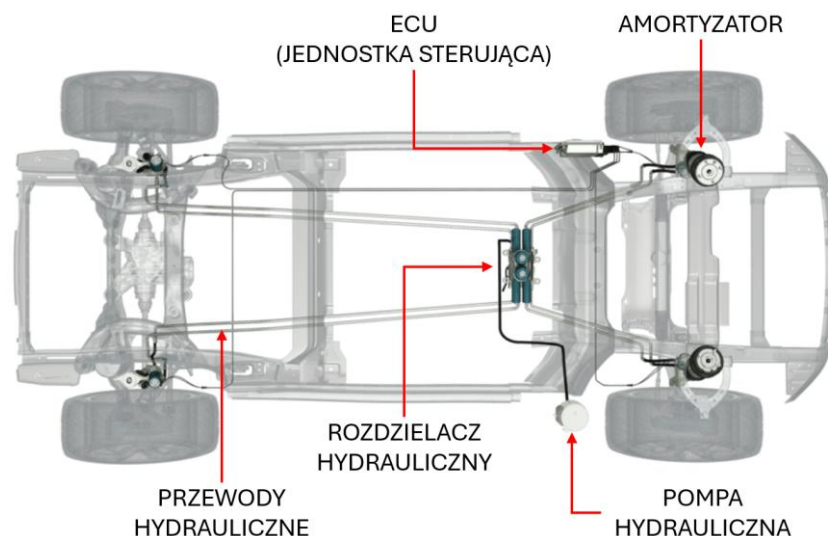
Skuteczne planowanie jakości wymaga dogłębnego zrozumienia zarówno charakterystyki produktu, jak i powiązanych z nim procesów produkcyjnych. Analiza cech konstrukcyjnych i funkcjonalnych wyrobu pozwala określić wymagania jakościowe oraz zidentyfikować potencjalne źródła ryzyk już na etapie jego projektowania. Z kolei znajomość procesów rozwoju i industrializacji umożliwia odpowiedni dobór inżynierskich instrumentów planowania jakości – od metod analitycznych, takich jak FMEA, po standardy wdrożeniowe APQP czy PPAP – co zapewnia spójność pomiędzy koncepcją produktu a jego produkcją seryjną. Świadomość wymagań i kompleksowa znajomość charakterystyki produktu i procesu stanowi fundament dla skutecznego zapobiegania niezgodnościom i budowania trwałej przewagi konkurencyjnej.

W podrozdziale 3.2.1 przedstawiono charakterystykę produktu będącego przedmiotem badań, ze szczególnym uwzględnieniem amortyzatorów sterowanych elektronicznie, podkreślając ich odmienność w zakresie funkcjonalności, wymagań i ryzyk jakościowych. Podrozdział 3.2.2 koncentruje się natomiast na procesach rozwoju i industrializacji, wskazując ich główne cele, różnice oraz powiązania ze standardami branżowymi, które stanowią podstawę systematycznego planowania jakości.

3.2.1. Charakterystyka produktu

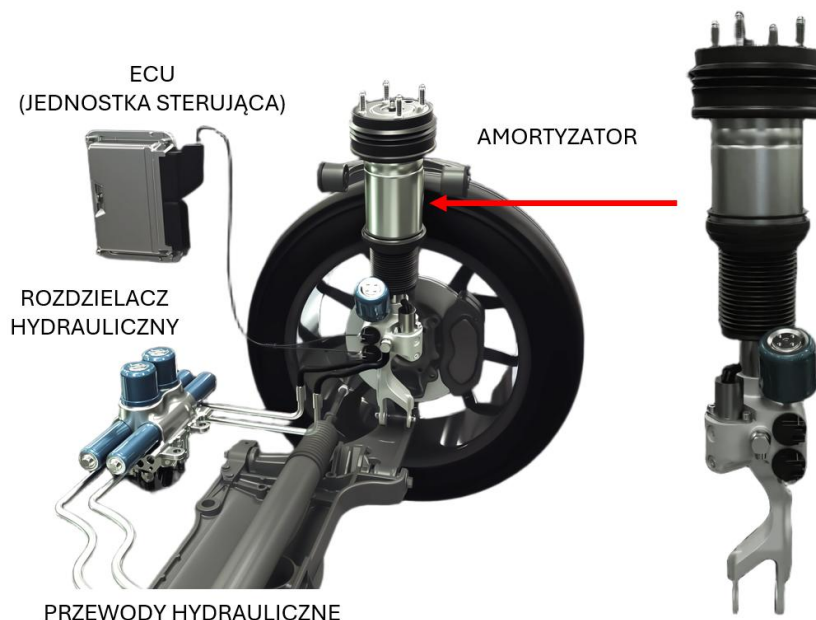
Przedmiotem badań niniejszej pracy doktorskiej są amortyzatory sterowane elektronicznie. Pełnią one tę samą podstawową funkcję tłumienia drgań co konstrukcje pasywne, jednak zakres ich działania jest znacząco rozszerzony. Dzięki integracji mechaniki, hydrauliki, elektroniki i oprogramowania sterującego stają się elementem złożonego systemu mechatronicznego, co rodzi istotne wyzwania dla procesu planowania jakości. W przeciwieństwie do amortyzatorów konwencjonalnych umożliwiają dynamiczne dopasowanie charakterystyk tłumienia do warunków jazdy i oczekiwań użytkownika, co zwiększa złożoność procesu projektowania i walidacji.

Przykładem takiej technologii jest system KINETIC rozwijany przez Tenneco. Działa on w oparciu o adaptacyjne sterowanie – zawory odpowiedzialne za przepływ oleju w amortyzatorze są kontrolowane elektronicznie i na bieżąco reagują na sygnały z czujników. Czujniki te mierzą m.in. przyspieszenia pojazdu i położenie nadwozia, a uzyskane dane pozwalają w czasie rzeczywistym zmieniać parametry pracy układu hydraulicznego. Dzięki temu amortyzator może nieustannie dopasowywać swoje charakterystyki do warunków jazdy. System KINETIC dobrze obrazuje złożoność współczesnych układów tłumienia, w których każdy element wpływa na funkcje końcowego produktu.



Rysunek 3.2.1.1. Uproszczony schemat układu hydraulicznego systemu KINETIC z widokiem z góry pojazdu [1W]

Podstawową funkcją systemu KINETIC jest dynamiczne regulowanie charakterystyki tłumienia poprzez sterowanie przepływem oleju w amortyzatorze. Dedykowana jednostka elektroniczna (ECU – Electronic Control Unit) analizuje dane pochodzące z czujników przyspieszenia, położenia nadwozia oraz prędkości pojazdu, aby w czasie rzeczywistym dostosowywać charakterystykę tłumienia amortyzatora. Rysunki 3.2.1.1 i 3.2.1.2 przedstawiają główne elementy systemu KINETIC oraz jego przykładowe umiejscowienie w pojeździe.



Rysunek 3.2.1.2. Przykład amortyzatorów będących częścią systemu Kinetic wraz z elementami pomocniczymi (opracowanie własne bazujące na [1W])

Podsystem hydrauliczny obejmuje pompę wysokociśnieniową, rozdzielacz z elektronicznie sterowanymi zaworami proporcjonalnymi oraz sieć przewodów łączących poszczególne elementy układu. Całość pracuje przy ciśnieniach dostosowanych do zmiennych obciążeń dynamicznych pojazdu, co zapewnia stabilność i szybkie reagowanie na warunki jazdy.

Bezpośrednie sterowanie tym układem umożliwia podsystem elektroniczny, w którego skład wchodzi jednostka sterująca ECU (Electronic Control Unit). Odpowiada ona za realizację algorytmów sterowania w czasie rzeczywistym, analizując dane z czujników przyspieszeń, położenia nadwozia czy prędkości kątowej. Dzięki interfejsom komunikacyjnym ECU współpracuje z innymi systemami pojazdu, takimi jak ESP, ABS czy kontrola trakcji, co pozwala na pełną integrację funkcji jezdnych.

Funkcjonalność całego rozwiązania uzupełnia podsystem mechaniczny, obejmujący amortyzatory z oddzielnymi układami zaworów pasywnych i aktywnych, działających niezależnie w fazie rozciągania i ściskania. Konstrukcja została zaprojektowana tak, aby jednocześnie przejmować rolę stabilizacji poprzecznej pojazdu, co eliminuje konieczność stosowania tradycyjnych stabilizatorów. Efekt ten uzyskano dzięki połączeniu amortyzatorów poszczególnych kół przewodami hydraulicznymi, które umożliwiają przenoszenie sił pomiędzy stronami pojazdu. Główne elementy nośne amortyzatora wykonano z aluminium, co pozwala zmniejszyć masę układu, przy zachowaniu wytrzymałości wymaganej w warunkach pracy pod wysokim obciążeniem. Jednocześnie sposób mocowania – zarówno górny, jak i dolny – pozostał zbliżony do rozwiązań stosowanych w amortyzatorach konwencjonalnych, co ułatwia ich integrację z istniejącymi platformami pojazdów.

Zastosowanie algorytmów adaptacyjnych działających w czasie rzeczywistym, system KINETIC oferuje większe możliwości sterowania niż rozwiązania konwencjonalne. System KINETIC kontroluje ruch nadwozia w trzech osiach ruchu nadwozia poprzez hydrauliczne sprzężenie pomiędzy poszczególnymi jednostkami amortyzującymi (Rysunek 3.2.1.3).

Isolation (izolacja wibracyjna) - system wykorzystuje elektronicznie sterowane zawory proporcjonalne do modulacji przepływu medium hydraulicznego, umożliwiając filtrację wysokoczęstotliwościowych drgań pochodzących od nierówności nawierzchni. Regulacja tłumienia odbywa się przez zmianę przekroju otworów przepływowych w zaworach sterowanych elektronicznie, co minimalizuje transmisję drgań do nadwozia,

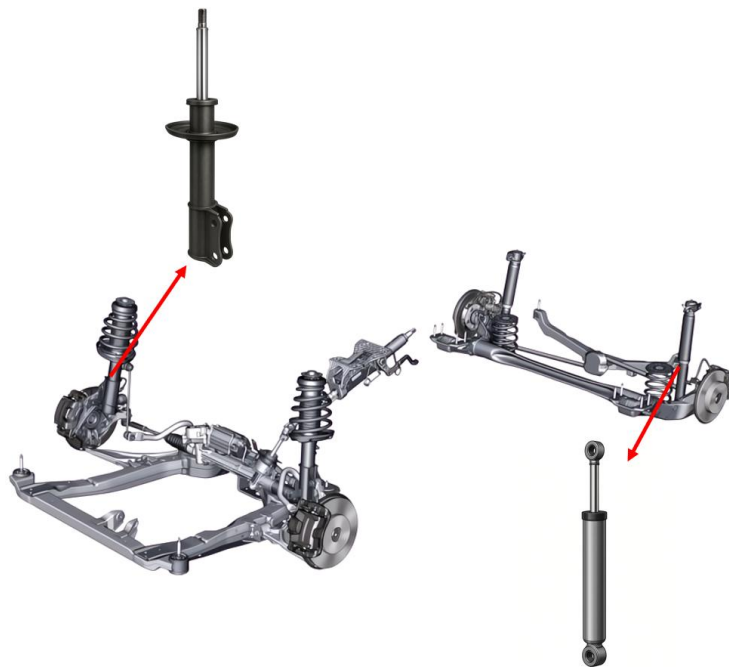
Pitch (kontrola przechyłów wzdłużnych) - hydrauliczne połączenie amortyzatorów osi przedniej i tylnej realizowane jest poprzez dedykowane przewody wysokociśnieniowe z elektronicznie sterowanymi zaworami rozdzielającymi. System umożliwia aktywną kontrolę kiwania nadwozia podczas hamowania i przyspieszania poprzez różnicowanie ciśnień roboczych między osiami oraz sterowane przekierowanie medium hydraulicznego.



Rysunek 3.2.1.3. Ilustracja podstawowych kierunków ruchu nadwozia: pionowy (isolation), przód–tył (pitch), boczny (roll) [1W]

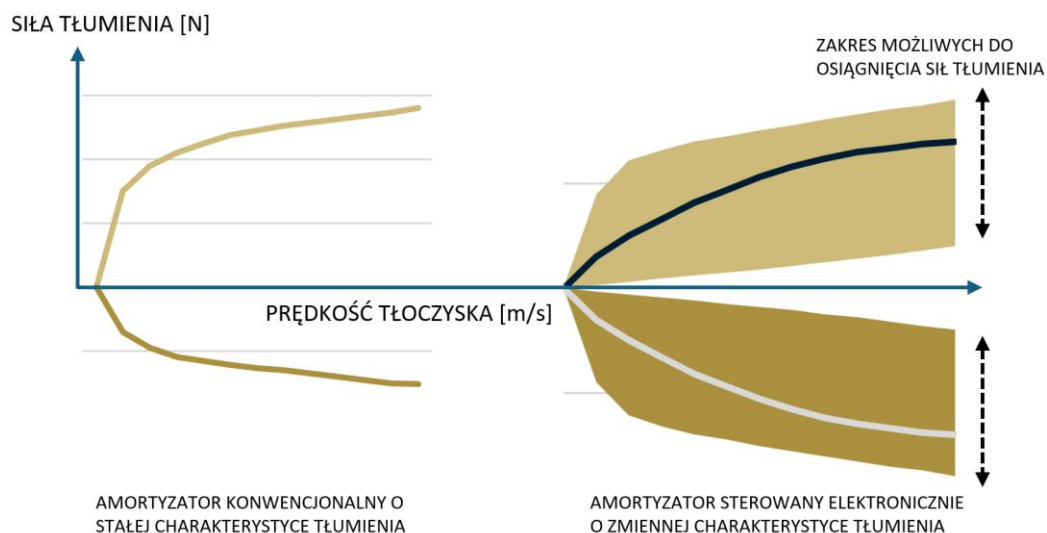
Roll (kontrola przechyłów bocznych) - poprzeczne sprzężenie hydrauliczne między amortyzatorami lewej i prawej strony pojazdu zastępuje funkcję konwencjonalnych stabilizatorów poprzecznych. Eliminacja przechylania nadwozia w zakrętach następuje poprzez automatyczne zwiększanie ciśnienia roboczego po stronie zewnętrznej łuku przy jednoczesnym zmniejszeniu oporu hydraulicznego po stronie wewnętrznej.

W dalszej części rozdziału przedstawiono analizę dotyczącą amortyzatorów konwencjonalnych, stanowiących punkt odniesienia dla oceny złożoności oraz specyfiki rozwiązań mechatronicznych. Są to konstrukcje o wieloletniej tradycji stosowania, których podstawową zaletą jest prostota budowy oraz przewidywalność charakterystyk pracy. Na rysunku 3.2.1.4 zaprezentowano przykładowe amortyzatory konwencjonalne wraz z ich umiejscowieniem w pojeździe, co pozwala lepiej zobrazować ich rolę w układzie zawieszenia i podkreślić różnice w stosunku do bardziej złożonych systemów sterowanych elektronicznie.



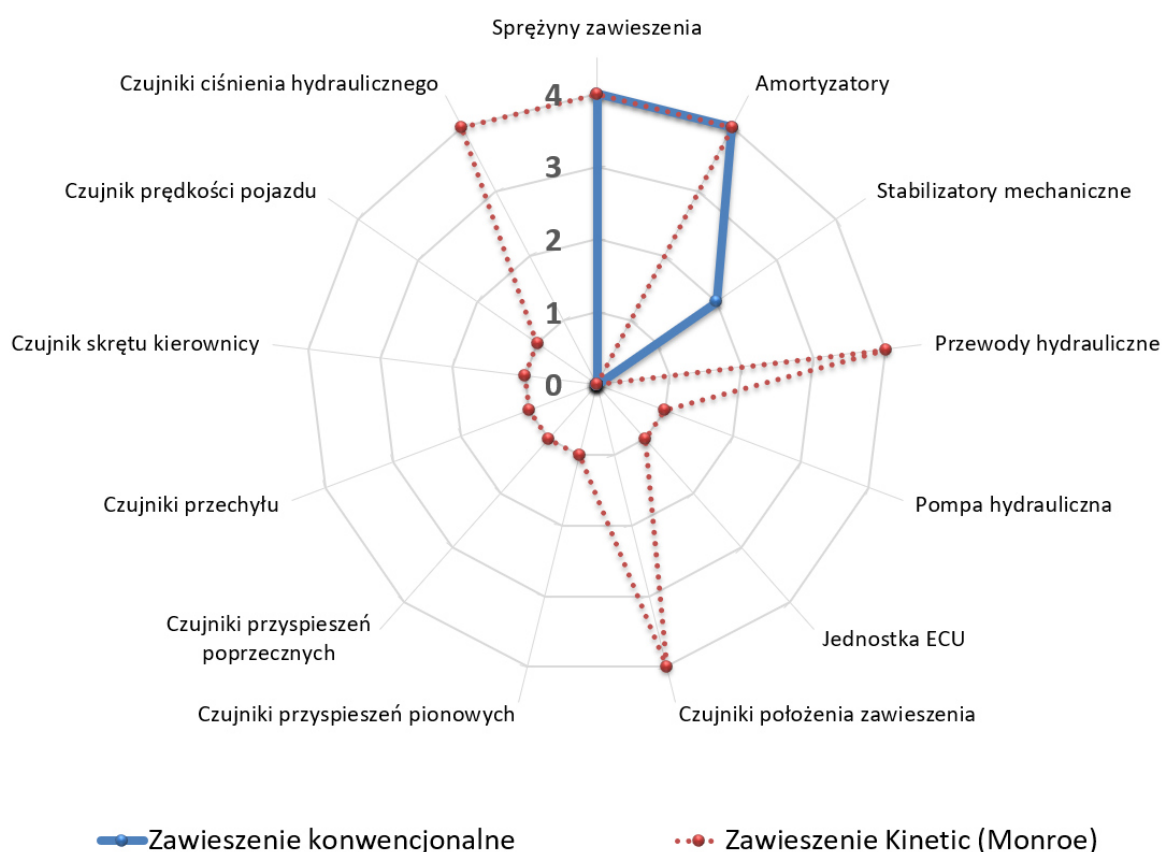
Rysunek 3.2.1.4. Przykład amortyzatorów konwencjonalnych oraz ich umiejscowienie w samochodzie (opracowanie własne bazując na [2W])

Amortyzatory konwencjonalne charakteryzują się prostą architekturą mechaniczną opartą na stalowych elementach strukturalnych. Korpus cylindra roboczego, pręt tłokowy oraz tłok z zaworami przepływowymi stanowią jednolitą konstrukcję. Tłumienie w klasycznym amortyzatorze zależy wyłącznie od przepływu oleju przez zawory o stałej geometrii, co oznacza brak możliwości jego regulacji w trakcie pracy i nie podlega modyfikacji w trakcie eksploatacji.



Rysunek 3.2.1.5. Wykres porównawczy charakterystyk tłumienia - stała krzywa dla amortyzatora konwencjonalnego vs zakres regulacji dla amortyzatora sterowanego elektronicznie (siła tłumienia vs prędkość tłoczyska amortyzatora) (opracowanie własne bazując na [1W- 2W])

Przedstawiona różnica w charakterystykach tłumienia (Rysunek 3.2.1.5) ma bezpośrednie przełożenie na złożoność architektoniczną systemu. Realizacja zmiennej charakterystyki tłumienia wymaga implementacji dodatkowych komponentów elektronicznych, hydraulicznych oraz układu sterowania, które nie są obecne w rozwiązaniach konwencjonalnych. Ta transformacja z systemu pasywnego na aktywny generuje wzrost liczby elementów systemu wymagających kontroli jakości oraz walidacji funkcjonalnej (Rysunek 3.2.1.6). Należy podkreślić, że przedstawione dane stanowią jedynie przykład ilustracyjny - finalne ilości poszczególnych elementów, szczególnie czujników, są definiowane przez danego producenta w zależności od specyficznych wymagań aplikacji.



Rysunek 3.2.1.6. Przykładowa liczba elementów występujących w zawieszeniu konwencjonalnym oraz systemie KINETIC (opracowanie własne)

W ramach niniejszych badań podjęto porównanie amortyzatorów konwencjonalnych i sterowanych elektronicznie w kontekście obszarów bezpośrednio związanych z planowaniem jakości. Analiza została ukierunkowana na te elementy dokumentacji i procesu rozwoju produktu, które odzwierciedlają poziom złożoności produktu oraz wymagania stawiane zespołom projektowym.

W pierwszej kolejności uwzględniono charakterystyki specjalne (Special Characteristics), które w branży motoryzacyjnej wymagają szczególnego nadzoru i stanowią istotny punkt odniesienia

dla oceny ryzyka. Kolejnym obszarem są zapisy konstrukcyjne w dokumentacji technicznej obejmujące zarówno parametry umieszczone na rysunkach klienta (Customer Drawings), jak i te umieszczone na dokumentacji wewnętrznej. Analiza obejmowała najwyższy poziom w zestawieniu BOM czyli produkt który dostaje klient OEM. Ujęcie to pozwala prześledzić różnice w liczbie oraz szczegółowości wymagań konstrukcyjnych.

Trzecim analizowanym elementem jest zestawienie materiałowe (Bill of Materials, BOM), które odzwierciedla strukturę produktu i wskazuje liczbę składowych komponentów. Na tej podstawie możliwe jest porównanie stopnia złożoności konstrukcji, wyrażającego się zarówno w liczbie elementów składowych. Uzupełnieniem analizy jest plan walidacji (Validation Plan), w którym zestawiono liczbę testów wymaganych w procesie rozwoju produktu oraz procesu, co pozwala zobrazować różnice w podejściu do potwierdzania zgodności wyrobu z wymaganiami.

W procesie planowania jakości szczególne znaczenie mają tzw. charakterystyki specjalne (Special Characteristics). Są to wymagania konstrukcyjne lub procesowe, które z uwagi na bezpieczeństwo, zgodność prawną, poprawność działania bądź bezawaryjność wyrobu wymagają dodatkowego nadzoru. Ich identyfikacja oraz właściwe oznaczenie w dokumentacji projektowej jest standardem branżowym stosowanym m.in. w ramach IATF 16949, APQP i PPAP. Wyróżnia się cztery podstawowe grupy (Tabela 3.2.1.1): krytyczne, krytyczne kontrolne, znaczące oraz ważne.

Tabela 3.2.1.1. Zestawienie znaczenia i symboli charakterystyk specjalnych (opracowanie własne)

	1. Charakterystyka Krytyczna (Critical safety)
	Charakterystyka krytyczna, która wpływa na bezpieczeństwo człowieka 100% ok - 0ppm
	2. Charakterystyka Krytyczna kontrolna
	Charakterystyka krytyczna kontrolna, która wpływa na wymagania prawne oraz na wymagania projektu Cpk>1,67
	3. Charakterystyka znacząca
	Charakterystyka znacząca wpływa na poprawność działania produktu Cpk>1,33
	4. Charakterystyka Ważna
	Charakterystyka ważna wpływa na bezawaryjność produktu Cpk>1

Na tej podstawie przeprowadzono analizę dokumentacji amortyzatorów konwencjonalnych i sterowanych elektronicznie. Wyniki wskazują (Tabela 3.2.1.2) na duży rozrzut w liczbie zidentyfikowanych charakterystyk specjalnych – od kilku do kilkudziesięciu w zależności od produktu. Co istotne, sam fakt zastosowania rozwiązań mechatronicznych nie determinuje większej liczby charakterystyk. Ich ilość zależy przede wszystkim od architektury technicznej amortyzatora, rodzaju systemu zaworowego oraz obecności dodatkowych elementów, takich jak sprężyna, górne mocowanie czy elementy elastomerowe. Znaczący wpływ mają również wymagania poszczególnych klientów OEM oraz przyjęta przez organizację filozofia oceny ryzyka.

Tabela 3.2.1.2. Zestawienie liczby charakterystyk specjalnych dla analizowanych typów amortyzatorów (opracowanie własne)

AMORTYZATORY KONWENCJONALNE			AMORTYZATORY STEROWANE ELEKTRONICZNE	
min	max		min	max
28	56	charakterystyka znacząca	30	68
2	19	charakterystyka ważna	2	4
0	2	charakterystyka krytyczna	0	0

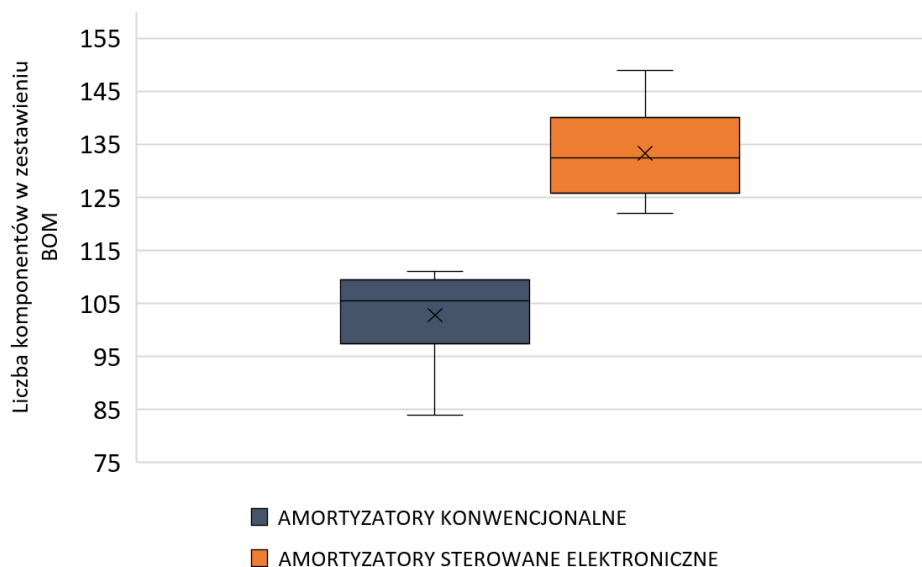
Analiza zestawienia liczbowego wskazuje, że w obu grupach produktów dominują charakterystyki znaczące. W amortyzatorach konwencjonalnych zakres ten wynosi od 28 do 56, natomiast w rozwiązaniach sterowanych elektronicznie – od 30 do 68. Pokazuje to, że zarówno w produktach klasycznych, jak i mechatronicznych występuje szeroki zakres parametrów wymagających podwyższonej kontroli.

W przypadku charakterystyk ważnych obserwuje się wyraźnie mniejszą skalę, przy czym w konstrukcjach konwencjonalnych ich liczba może sięgać nawet 19, podczas gdy w produktach elektronicznych maksymalna wartość nie przekracza 4. Może to wynikać z różnic w podejściu do definiowania wymagań dla obu typów rozwiązań.

Charakterystyki krytyczne, bezpośrednio powiązane z bezpieczeństwem użytkownika, występują rzadko i w niewielkiej liczbie – od 0 do 2 w przypadku amortyzatorów konwencjonalnych, a w systemach sterowanych elektronicznie nie zostały odnotowane.

Podsumowując, analiza wskazuje na duży rozrzut wartości w obrębie poszczególnych kategorii charakterystyk, co odzwierciedla zróżnicowanie projektów i specyficzne wymagania klientów. Wyniki potwierdzają, że liczba charakterystyk specjalnych zależy nie tyle od samej klasy produktu (konwencjonalny vs elektroniczny), ile od szczegółowej konfiguracji konstrukcyjnej i zakresu funkcjonalności.

Następnym krokiem analizy było porównanie liczby komponentów ujętych w zestawieniu materiałowym (Bill of Materials, BOM). W przeciwieństwie do charakterystyk specjalnych, które mogą być różnie definiowane w zależności od klienta i założonej architektury produktu, BOM stanowi obiektywną miarę złożoności konstrukcji. Większa liczba elementów oznacza nie tylko bardziej skomplikowany produkt, ale także szerszy zakres planowania jakości, obejmujący więcej potencjalnych punktów kontroli i testów walidacyjnych.



Rysunek 3.2.1.7. Liczba komponentów w zestawieniu BOM – amortyzatory konwencjonalne i sterowane elektronicznie (opracowanie własne)

Wyniki przedstawione na wykresie (Rysunek 3.2.1.7) wskazują jednoznacznie na różnice pomiędzy obiema grupami produktów. Amortyzatory konwencjonalne zawierają przeciętnie około 100 komponentów, natomiast w rozwiązaniach sterowanych elektronicznie liczba ta wzrasta do ponad 130. Pokazuje to, że systemy mechatroniczne są konstrukcyjnie bardziej rozbudowane i wymagają większej liczby części składowych. Należy przy tym zaznaczyć, że przedstawiony wykres opiera się na wybranych przykładach i pełni funkcję ilustracyjną, wykazując kierunek różnic w strukturze BOM.

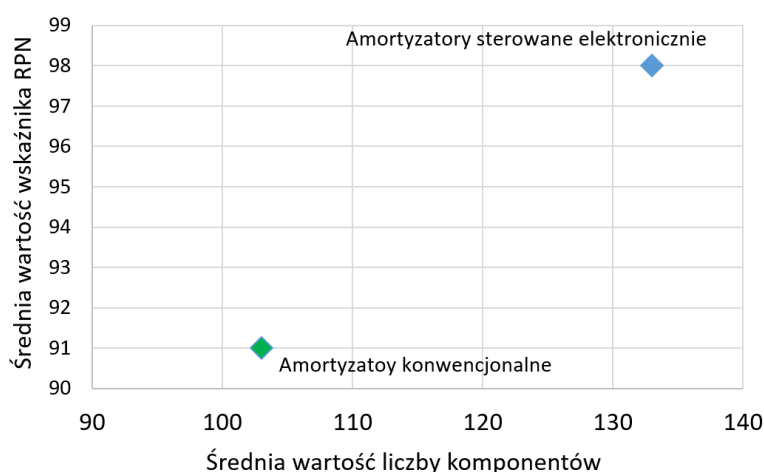
W procesie walidacji występują istotne różnice pomiędzy amortyzatorami konwencjonalnymi a sterowanymi elektronicznie, szczególnie w zakresie liczby oraz charakteru wykonywanych badań. Typowa lista testów walidacyjnych obejmuje od 25 do 38 pozycji. Liczba testów w obu przypadkach mieści się w tym przedziale, jednak różni się zakresem wymagań oraz interpretacją wyników. Przykładowo amortyzatory konwencjonalne, o stalowym korpusie pokrytym powłoką lakierniczą, poddawane są innym kryteriom oceny w testach korozyjnych i środowiskowych niż amortyzatory sterowane elektronicznie, w których stosuje się elementy aluminiowe z powłoką anodowaną. W przypadku badań funkcjonalnych, takich jak weryfikacja charakterystyki tłumienia, amortyzatory sterowane wymagają większej liczby pomiarów, ponieważ analizuje się przebieg charakterystyki dla różnych poziomów prądu sterującego zaworem aktywnym.

Dodatkowo, w sytuacji gdy przedmiotem walidacji jest system zawierający więcej niż jeden podzespół – jak ma to miejsce w przypadku systemu Kinetik – konieczne jest przeprowadzenie dodatkowych badań dla każdego elementu składowego. Na przykład dla rozdzielacza hydraulicznego wchodzącego w skład systemu wykonywanych jest od 8 do 13 dodatkowych testów, co znacząco rozszerza całkowity zakres walidacji.

3.2.2. Charakterystyka i porównanie produktów konwencjonalnych oraz mechatronicznych

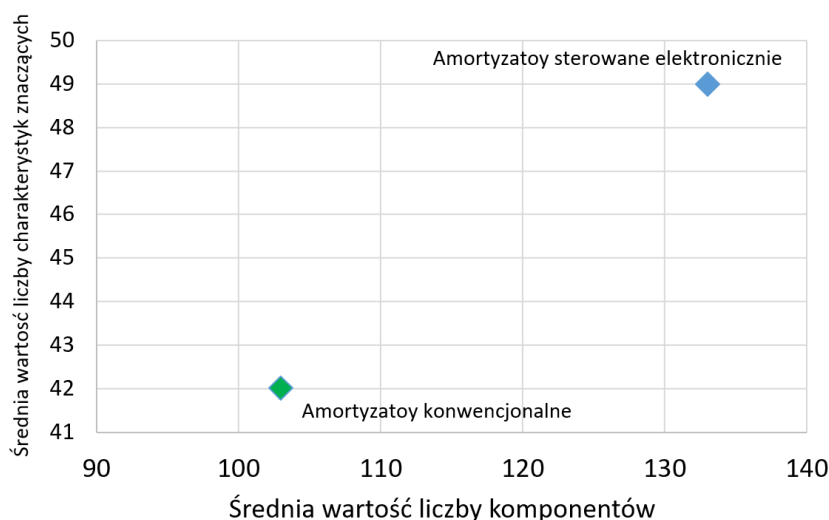
W celu pogłębionej oceny złożoności analizowanych produktów proponuje się zastosowanie wskaźników opartych na relacji pomiędzy liczbą komponentów w zestawieniu materiałowym (BOM) a kluczowymi parametrami jakościowymi. Pierwszy z nich to stosunek średniej wartości liczby komponentów w BOM do średniej wartości liczby charakterystyk specjalnych – w niniejszym przypadku ograniczony do charakterystyk znaczących (charakterystyki krytyczne pojawiały się jedynie w wybranych konfiguracjach amortyzatorów konwencjonalnych, natomiast charakterystyki ważne odnosiły się przede wszystkim do komponentów standardowych (*off-the-shelf*). Wskaźnik ten pozwala zobrazować, w jakim stopniu złożoność konstrukcyjna produktu (wyrażona liczbą komponentów) przekłada się na liczbę krytycznych parametrów wymagających szczególnego nadzoru. Drugim proponowanym podejściem jest korelacja średniej wartości liczby komponentów w BOM do średniej wartości wskaźnika RPN (Risk Priority Number), co umożliwia ilościową ocenę związku pomiędzy wielkością i złożonością struktury produktu a skumulowanym poziomem ryzyka technologicznego i jakościowego. Wprowadzenie takich wskaźników pozwala w sposób bardziej systematyczny porównywać różne konfiguracje produktów oraz identyfikować obszary wymagające priorytetowego doskonalenia.

Analiza (Rysunek 3.2.2.1) wykazała, że amortyzatory sterowane elektronicznie, ze względu na większą średnią wartość liczby komponentów, charakteryzują się wyższą wartością średnią wskaźnika RPN w porównaniu z produktami konwencjonalnymi. Oznacza to, że wzrost złożoności konstrukcji bezpośrednio przekłada się na wyższy poziom ryzyka projektowego i procesowego, co potwierdza konieczność stosowania bardziej zaawansowanych instrumentów planowania jakości w przypadku produktów mechatronicznych.



Rysunek 3.2.2.1. Zależność średniej wartości wskaźnika RPN od średniej wartości liczby komponentów dla amortyzatorów konwencjonalnych i sterowanych elektronicznie (opracowanie własne)

Na wykresie (Rysunek 3.2.2.2) przedstawiono zależność średniej wartości liczby charakterystyk znaczących od średniej wartości liczby komponentów w amortyzatorach konwencjonalnych i sterowanych elektronicznie. Wyniki wskazują na wyraźny wzrost obu wskaźników – amortyzatory konwencjonalne osiągają średnio 103 komponenty i 42 charakterystyki znaczące, natomiast sterowane elektronicznie średnio 133 komponenty i 49 charakterystyk znaczących. Zależność ta potwierdza, że większa złożoność konstrukcji wiąże się z większą liczbą parametrów wymagających szczególnego nadzoru w procesie rozwoju i industrializacji.



Rysunek 3.2.2.2. Zależność średniej wartości liczby charakterystyk znaczących od średniej wartości liczby komponentów dla amortyzatorów konwencjonalnych i sterowanych elektronicznie (opracowanie własne)

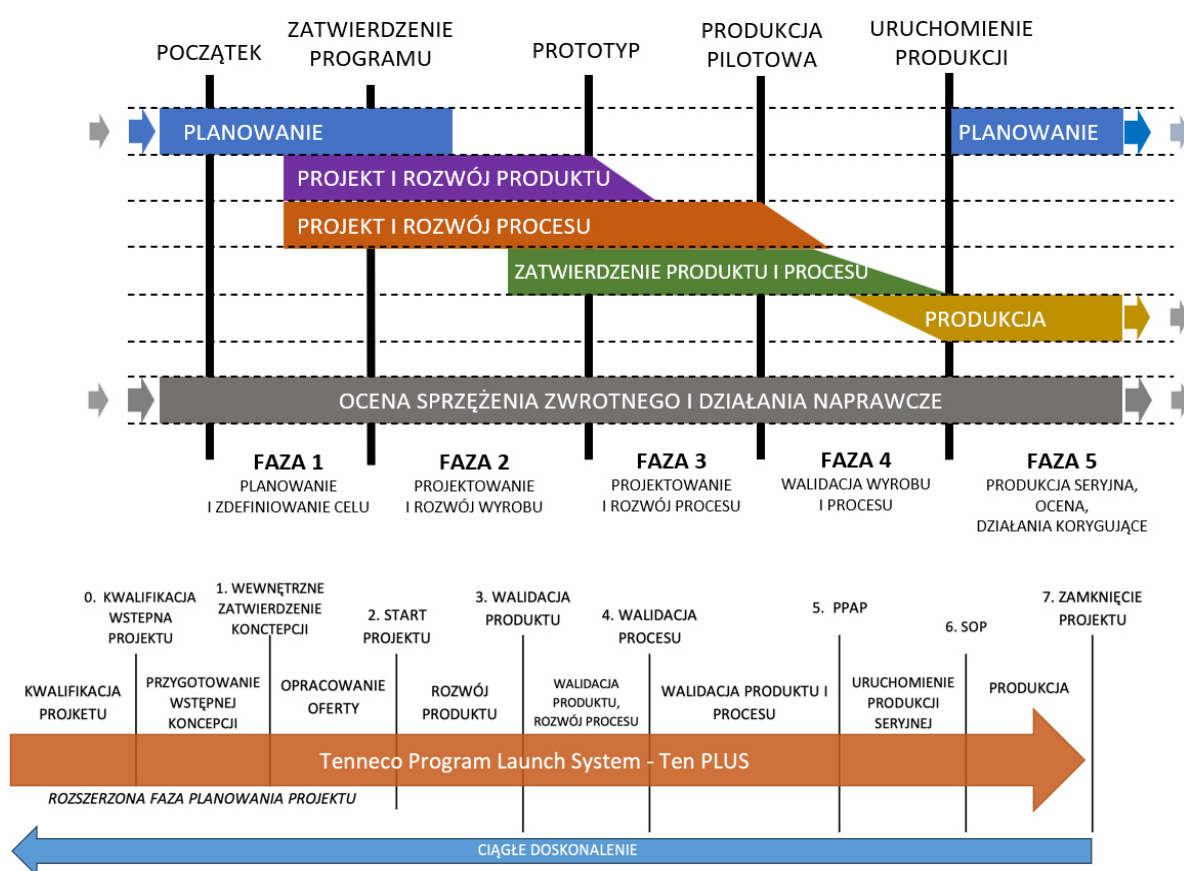
Uzyskane wyniki wskazują, że zarówno relacja średniej wartości liczby komponentów do średniej wartości liczby charakterystyk znaczących, jak i zależność średniej wartości liczby komponentów od średniej wartości wskaźnika RPN potwierdzają większą złożoność oraz wyższy poziom ryzyka w przypadku amortyzatorów sterowanych elektronicznie w porównaniu z produktami konwencjonalnymi. Zależności te pozwalają w sposób ilościowy powiązać rozbudowaną strukturę produktu z obciążeniem procesów planowania jakości. Dzięki temu możliwe stają się systematyczne porównywanie różnych konfiguracji produktów oraz wskazanie obszarów wymagających szczególnie intensywnego nadzoru i doskonalenia.

3.2.3. Charakterystyka procesu

Prezentowane analizy powstały w ramach projektu doktorskiego o charakterze wdrożeniowym, realizowanego w Tenneco Automotive Eastern Europe. Badania prowadzone były w środowisku przemysłowym, co umożliwiło weryfikację opracowanych instrumentów i ich wpływu na procesy rozwoju oraz industrializacji produktu.

W tym kontekście kluczową rolę odgrywa system TenPLUS, oparty na założeniach metodologii APQP, lecz dostosowany do specyfiki procesów rozwoju i wdrażania amortyzatorów. Zachowując zgodność z podstawowymi zasadami APQP, system ten został rozszerzony o strukturę typu stage-gate, obejmującą osiem etapów i siedem bram decyzyjnych.

System TenPLUS został opracowany jako rozszerzona struktura planowania jakości, obejmująca osiem etapów i siedem punktów decyzyjnych. Każdy z tych punktów pełni funkcję formalnej oceny, w której analizowana jest gotowość projektu do przejścia do kolejnej fazy. Takie podejście umożliwia prowadzenie projektów w sposób uporządkowany i ujednolicony, co ma szczególne znaczenie w przypadku produktów o rosnącej złożoności technicznej. Rysunek 3.2.3.1 przedstawia porównanie standardowego modelu APQP z systemem Ten PLUS stosowanym w Tenneco.



Rysunek 3.2.3.1. Porównanie standardowego modelu APQP z systemem Ten PLUS stosowanym w Tenneco (opracowanie własne na podstawie APQP i Ten PLUS)

Proces rozpoczyna się od etapu Qualify (Kwalifikacja), którego zadaniem jest wstępna ocena projektu pod kątem technicznym i biznesowym. Na tym etapie zapada decyzja o zasadności dalszych prac, co pozwala uniknąć angażowania zasobów w inicjatywy o ograniczonych perspektywach rozwoju. Kolejne kroki to Propose (Przygotowanie wstępnej koncepcji) oraz Quote (Opracowanie oferty), w ramach, których powstają propozycje rozwiązań technicznych i handlowych przedstawianych klientowi.

W fazie Design & Development (Rozwój produktu) opracowywane są konstrukcje amortyzatorów oraz przygotowywane są założenia dla procesów wytwórczych. Następnie, w ramach Design Verification (Walidacja produktu i rozwój procesu), sprawdzana jest zgodność wyrobu z wymaganiami. Kolejny etap, Process Validation (Walidacja produktu i procesu), pozwala ocenić przygotowanie technologiczne i produkcyjne, co jest kluczowe dla zapewnienia powtarzalności i stabilności parametrów wytwarzania.

Dalsze kroki obejmują Pre-Production/PPAP (Zatwierdzenie produktu i procesu), czyli formalne potwierdzenie gotowości do rozpoczęcia produkcji seryjnej, a następnie Production (Produkcję seryjną i SOP). Całość zamyka etap Project Closure (Zamknięcie projektu), w ramach którego dokonuje się podsumowania wyników i analizy przebiegu realizacji.

W kontekście badań system Ten PLUS stanowi istotne źródło danych oraz punkt odniesienia dla analizy skuteczności instrumentów planowania jakości. Jego szczegółowa struktura pozwala na śledzenie przebiegu procesu planowania jakości od kwalifikacji projektu aż po produkcję seryjną, co umożliwia identyfikację obszarów wymagających usprawnień. Dzięki temu możliwe jest badanie, w jaki sposób zastosowanie wybranych instrumentów planowania jakości wpływa na redukcję liczby niezgodności, terminowość realizacji poszczególnych faz oraz efektywność całego cyklu rozwoju amortyzatorów sterowanych elektronicznie.

Jednym z istotnych elementów systemu TenPLUS jest proces Design & Manufacturing Sign-Off (DMSO), stanowiący formalne potwierdzenie zgodności pomiędzy wymaganiami projektowymi a możliwościami procesów produkcyjnych. Mechanizm ten pełni funkcję punktu decyzyjnego, w którym oceniane są kluczowe aspekty dotyczące zarówno konstrukcji produktu, jak i warunków jego wytwarzania.

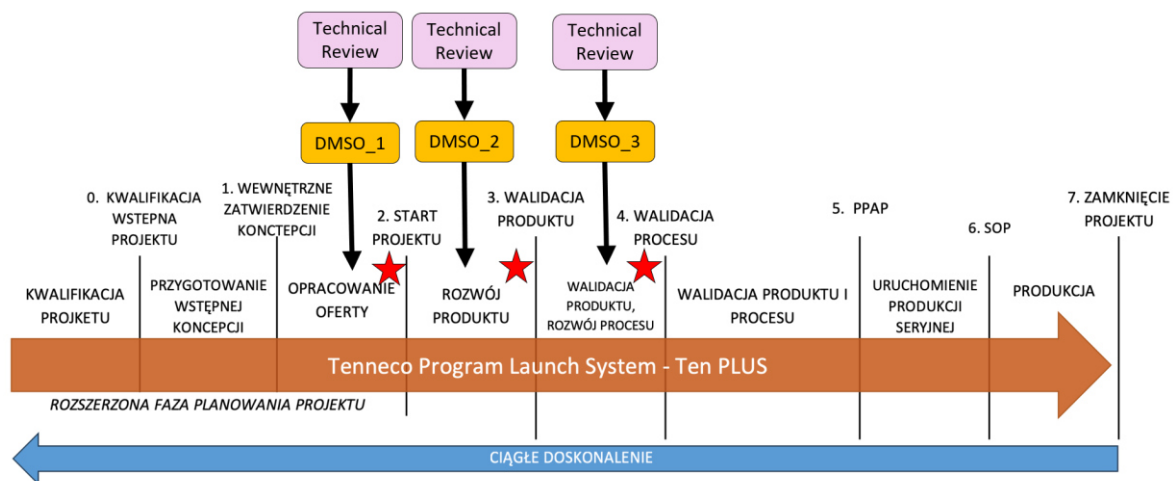
Wdrożenie DMSO zostało przewidziane w trzech etapach: Quote DMSO (przed fazą ofertowania), DV DMSO (przed walidacją konstrukcji – *Design Verification*) oraz PV DMSO (przed walidacją procesu produkcyjnego – *Process Validation*). Każdy z nich obejmuje formalną ocenę zdolności procesu do spełnienia wymagań konstrukcyjnych i jakościowych.

Zakres weryfikacji w ramach DMSO obejmuje nie tylko dopasowanie projektu do ograniczeń technologicznych, lecz także:

- zgodność harmonogramu projektu z przyjętymi etapami rozwoju i industrializacji,
- aspekty komercyjne, w tym zgodność warunków ofertowych i kontraktowych,
- wymagania jakościowe dotyczące Planu Kontroli, niezbędnych narzędzi pomiarowych
- ocenę przygotowania i stabilności łańcucha dostaw, stan nominowania dostawców
- analizę decyzji „kup lub wytwórz” (buy vs. make) dla kluczowych komponentów.

W procesie tym szczególną rolę odgrywa instrument Technical Review, który stanowi jedno z głównych wejść do DMSO (Rysunek 3.2.3.2). Pozwala on na ocenę kompletności dokumentacji technicznej oraz wszystkich aspektów związanych z częścią projektową i konstrukcyjną, w tym spójności wymagań, założeń konstrukcyjnych oraz danych wejściowych do dalszych analiz inżynierskich, takich jak DFMEA, analizy wytrzymałościowe, symulacje numeryczne,

opracowanie planu kontroli prototypu czy przygotowanie listy materiałowej (BOM). Dzięki temu możliwa jest identyfikacja zagadnień wymagających potwierdzenia przed formalnym zatwierdzeniem zgodności projektu z możliwościami produkcyjnymi organizacji.



Rysunek 3.2.3.2. Umiejscowienie procesu DMSO w strukturze TenPLUS oraz jego powiązanie z Technical Review (opracowanie własne na podstawie Ten PLUS)

Implementacja systemu TenPLUS wymagała dostosowania struktury zespołów projektowych do specyfiki rozwoju amortyzatorów nowej generacji. Kluczową rolę pełni Application Engineer (Inżynier Aplikacji), odpowiedzialny za integrację komponentów w spójny system produktowy oraz koordynację działań między obszarami technicznymi. MET Engineer (Inżynier MET – Manufacturing Engineering & Technology) uczestniczy w procesie od wczesnych etapów projektowania, zapewniając możliwość realizacji konstrukcji w warunkach produkcyjnych i ograniczając ryzyko problemów podczas industrializacji produktu. Launch Manager (Kierownik Wdrożenia) nadzoruje przygotowanie i uruchomienie produkcji, a Quality Engineer (Inżynier Jakości) odpowiada za zapewnienie zgodności z wymaganiami jakościowymi oraz regulacyjnymi.

3.3. Diagnoza stanu i identyfikacja niezgodności

W celu identyfikacji kluczowych niezgodności występujących w procesie planowaniu jakości dla amortyzatorów sterowanych elektronicznie wykorzystano dane pochodzące z wewnętrznego procesu eskalacji Red/Yellow/Green (RYG), stanowiącego integralny element metodologii Ten PLUS (Tenneco Program Launch System) – systemu planowania jakości wdrożonego w organizacji Tenneco. Analizie poddano zgłoszenia zarejestrowane w okresie od stycznia 2022 roku do czerwca 2023 roku, w ramach prac badawczo-wdrożeniowych realizowanych na potrzeby niniejszego projektu doktorskiego.

W celu zapewnienia pełniejszego kontekstu realizowanych badań, zebrane dane dla amortyzatorów sterowanych elektronicznie zestawiono z danymi dotyczącymi amortyzatorów konwencjonalnych. Takie porównanie umożliwia nie tylko ilościową ocenę skali występujących niezgodności, lecz także ich jakościowe zróżnicowanie pod względem ich rodzaju i charakteru. Powyższe umożliwiło określenie specyfiki problemów pojawiających się w procesach planowania jakości produktów mechatronicznych na tle produktów o konwencjonalnych.

Do procesu RYG trafiają wyłącznie te niezgodności, które mogą mieć istotny wpływ na przebieg i wynik projektu – dotyczące opóźnień w harmonogramie jego realizacji, ryzyka przekroczenia budżetu, niespełnienia wymagań technicznych lub jakościowych, a także zagrożenia dla bezpieczeństwa i satysfakcji klienta. Oznacza to, że do eskalacji włączane są jedynie problemy o strategicznym znaczeniu, wymagające priorytetowego traktowania i systematycznego monitorowania aż do ich całkowitego rozwiązania.

Każda eskalowana niezgodność w systemie RYG jest przypisywana do odpowiedniej fazy projektu, w której występuje. Takie przypisanie zapewnia identyfikowalność źródeł problemów w procesie planowania jakości, umożliwiając precyzyjne śledzenie ich genezy oraz ocenę skuteczności zastosowanych działań zapobiegawczych. Ponadto, pozwala to na identyfikację etapów projektu najbardziej podatnych na występowanie niezgodności, co stanowi istotne wsparcie dla działań doskonalących i analiz ryzyka.

Kluczowym elementem funkcjonowania systemu RYG są cotygodniowe spotkania przeglądu w interdyscyplinarnym zespole pracowników, organizowane globalnie w ramach poszczególnych regionów geograficznych koncernu. W skład zespołu wchodzi przedstawiciele różnych obszarów i poziomów funkcyjnych Centrum Inżynieryjnego, co zapewnia pełne pokrycie kompetencji technicznych i umożliwia podejmowanie decyzji w oparciu o kompleksową wiedzę na temat procesów rozwoju i industrializacji.

Zastosowanie procesu RYG jako źródła danych dla diagnozy stanu procesu planowania jakości zapewnia obiektywność analizy oraz wiarygodność wnioskowania, ponieważ opiera się na rzeczywistych niezgodnościach zidentyfikowanych podczas realizacji projektów przemysłowych w warunkach produkcyjnych.

Na potrzeby analizy wszystkie niezgodności zostały pogrupowane w kategorii niezgodności, co umożliwiło ich uporządkowanie i usystematyzowanie według źródła ich wystąpienia. Podział ten pozwala wskazać, w jakich obszarach procesu rozwoju i industrializacji amortyzatorów pojawiają się najczęściej niezgodności trafiające do bazy RYG oraz jakiego rodzaju mają one charakter.

Tabela 3.3.1. Kategorie i podkategorie niezgodności w procesie eskalacji RYG, związane z wystąpieniem niezgodności (opracowanie własne)

Lp.	KATEGORIA NIEZGODNOŚCI	PODKATEGORIA NIEZGODNOŚCI
1_RYG	Niespełnienie wymagań dotyczących walidacji produktu	>Walidacja nie uwzględnia krytycznych scenariuszy zastosowania >Wewnętrzne testy walidacyjne nie zapewniają potwierdzenia zgodności >Wyniki walidacji u klienta wskazują na niespełnienie wymagań
2_RYG	Niezgodności w dokumentacji projektowej (technicznej i jakościowej)	>Rozbieżności, braki lub niespójności w dokumentacji technicznej CAD / GPDM >Niepełne, niejednoznaczne lub błędnie odwzorowane wymagania klienta w dokumentacji
3_RYG	Niespełnienie wymagań materiałowych lub komponentowych	>Zmienność parametrów materiałowych wpływająca na stabilność funkcji wyrobu >Komponenty dostarczone spoza zatwierdzonej listy źródeł (brak zatwierdzenia przez klienta lub organizację) >Nie zgodność cech fizykochemicznych materiału z wymaganiami specyfikacji technicznej >Brak zgodności komponentów z aktualną dokumentacją projektową (np. rysunek, specyfikacja klienta) >Brak potwierdzenia zgodności materiałów lub komponentów w dokumentacji jakościowej (np. certyfikaty, wyniki testów)
4_RYG	Niedotrzymanie terminów projektowania i wdrażania	>Brak działań usprawniających produkt lub proces na etapie rozwoju >Opóźnienia wynikające z ograniczonej dostępności zasobów do walidacji >Niedotrzymanie harmonogramu realizacji wymagań klienta lub wewnętrznych
5_RYG	Niezgodności w realizacji procesu produkcyjnego	>Proces realizowany z odchyleniami od zatwierdzonych parametrów technologicznych >Nieprzestrzeganie zatwierdzonych instrukcji operacyjnych >Konieczność ponownego przetworzenia wyrobu (rework, reprocessing)
6_RYG	Niespełnienie wymagań funkcjonalnych i eksploatacyjnych produktu	>Brak spełnienia wymagań funkcjonalnych określonych w specyfikacji >Ograniczona możliwość prawidłowego zastosowania produktu u użytkownika końcowego >Zgłoszona reklamacja klienta związana z eksploatacją produktu

Zestawienie przedstawione w tabeli 3.3.1 charakteryzuje sześć głównych kategorii niezgodności wraz z przypisanymi im podkategoriami, które opisują najczęściej występujące niezgodności w procesie planowania jakości.

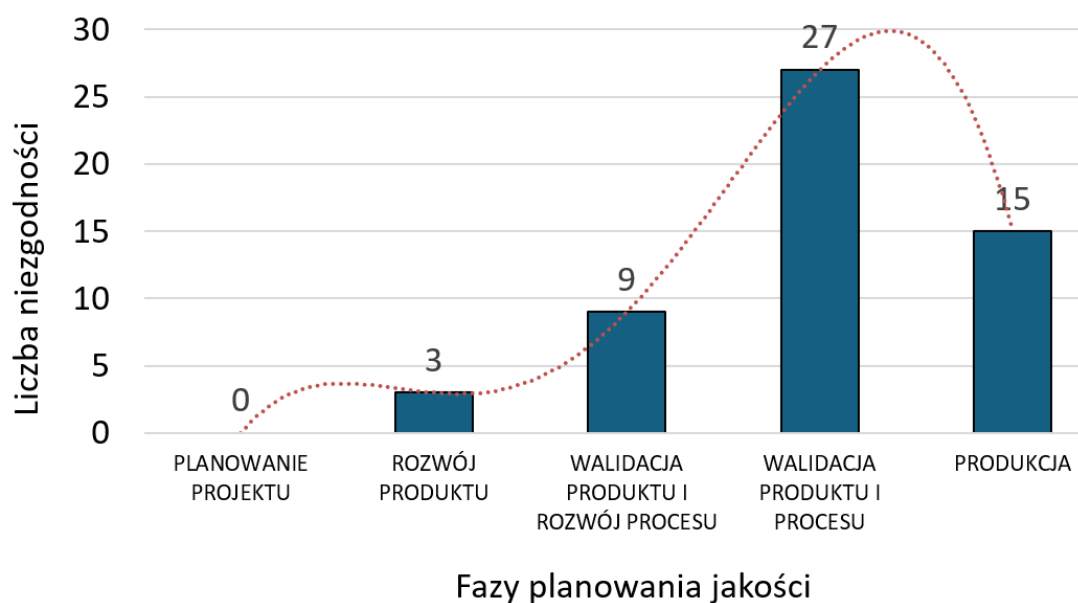
Kolejnym etapem analizy było zestawienie liczby niezgodności w odniesieniu do poszczególnych faz procesu planowania jakości zgodnych z metodologią Ten PLUS. W okresie trwania badań do bazy RYG trafiło 20 projektów z obszaru amortyzatorów sterowanych elektronicznie. Tabela 3.3.2 prezentuje rozkład liczby niezgodności oraz w jakiej fazie nastąpiła eskalacja do bazy RYG. Zestawienie to umożliwia identyfikację faz procesu APQP szczególnie podatnych na występowanie niezgodności oraz stanowi podstawę do dalszej interpretacji ich charakteru i znaczenia dla realizacji projektu.

Tabela 3.3.2. Liczba niezgodności w poszczególnych fazach planowania jakości (Ten PLUS) dla amortyzatorów sterowanych elektronicznie (opracowanie własne)

Lp.	KATEGORIA NIEZGODNOŚCI	PLANOWANIE PROJEKTU	ROZWÓJ PRODUKTU	WALIDACJA PRODUKTU I ROZWÓJ PROCESU	WALIDACJA PRODUKTU I PROCESU	PRODUKCJA
1_RYG	Niespełnienie wymagań dotyczących walidacji produktu	0	0	7	12	1
2_RYG	Niezgodności w dokumentacji projektowej (technicznej i jakościowej)	0	1	0	3	0
3_RYG	Niespełnienie wymagań materiałowych lub komponentowych	0	1	1	2	1
4_RYG	Niedotrzymanie terminów projektowania i wdrażania	0	0	0	6	1
5_RYG	Niezgodności w realizacji procesu produkcyjnego	0	0	1	1	3
6_RYG	Niespełnienie wymagań funkcjonalnych i eksploatacyjnych produktu	0	1	0	3	9

Analiza zestawienia liczby niezgodności w poszczególnych fazach planowania jakości (Rysunek 3.3.1), wskazuje, że największa ich koncentracja występuje w obszarze walidacji produktu i procesu (27 przypadków), a następnie w fazie produkcji (15 przypadków). Wcześniejsze etapy – planowanie projektu i rozwój produktu – generują stosunkowo niewielką liczbę niezgodności

(odpowiednio 0 i 3 zgłoszenia), co sugeruje, że zasadnicze trudności ujawniają się na późniejszych etapach, gdy projektowane rozwiązania podlegają weryfikacji praktycznej. Istotne jest także, że faza walidacji produktu i rozwoju procesu odnotowała 9 przypadków, co stanowi swoiste „przejście” pomiędzy częścią projektową a produkcyjną i wskazuje na potrzebę szczególnej uwagi w tym obszarze. Łącznie ponad 80% niezgodności koncentruje się w dwóch końcowych fazach – walidacyjnej i produkcyjnej – co potwierdza, że są one kluczowe dla skuteczności procesu planowania jakości amortyzatorów sterowanych elektronicznie.

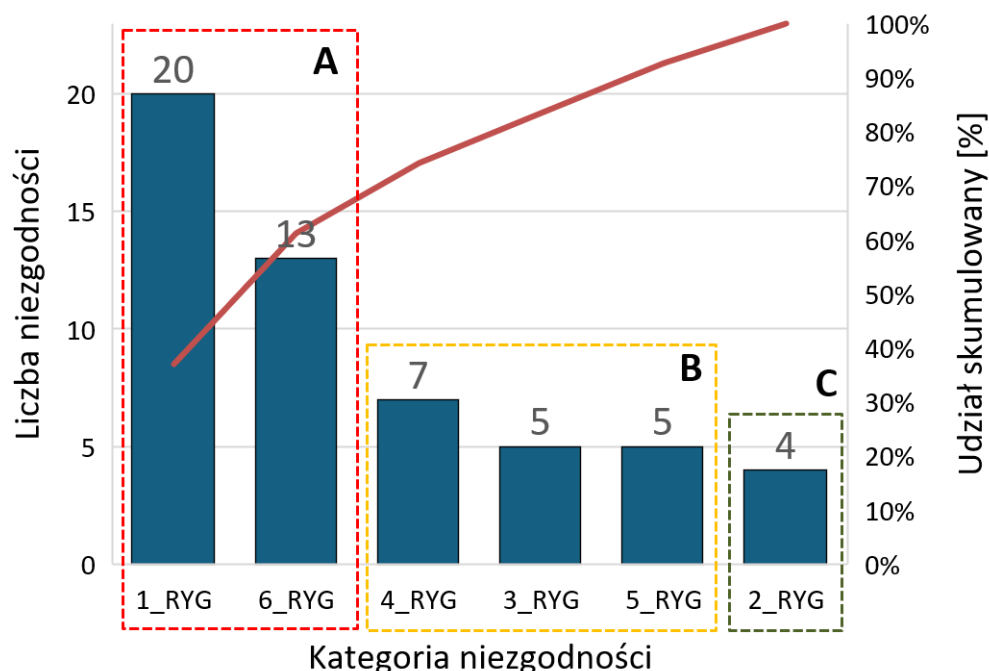


Rysunek 3.3.1. Liczba niezgodności w poszczególnych fazach planowania jakości (Ten PLUS) dla amortyzatorów sterowanych elektronicznie z zaznaczoną linią trendu (opracowanie własne)

Wykres (Rysunek 3.3.2) przedstawia analizę Pareto dla liczby niezgodności według kategorii RYG dla amortyzatorów sterowanych elektronicznie (dane z Tabeli 3.3.2), z podziałem na strefy A, B i C. Do strefy A zaklasyfikowano dwie kategorie o największym udziale: 1_RYG – niespełnienie wymagań dotyczących walidacji produktu, co stanowi 20 przypadków, czyli 37% wszystkich niezgodności, oraz 6_RYG – niespełnienie wymagań funkcjonalnych i eksploatacyjnych produktu, co stanowi 13 przypadków, czyli 24,1% wszystkich niezgodności. Łącznie strefa A obejmuje 61,1% wszystkich zgłoszeń, co jednoznacznie potwierdza ich kluczowe znaczenie dla skuteczności procesu planowania jakości.

Strefa B obejmuje trzy kolejne kategorie: 4_RYG – niedotrzymanie terminów projektowania i wdrażania, co stanowi 7 przypadków, czyli 13%, 3_RYG – niespełnienie wymagań materiałowych lub komponentowych, co stanowi 5 przypadków, czyli 9,3%, oraz 5_RYG – niezgodności w realizacji procesu produkcyjnego, co stanowi 5 przypadków, czyli 9,3%. Łącznie strefa B odpowiada za 31,6% wszystkich niezgodności, co wskazuje na ich istotne znaczenie, jednak znacznie mniejsze niż w strefie A.

Do strefy C zaliczono kategorię 2_RYG – niezgodności w dokumentacji projektowej, co stanowi 4 przypadki, czyli 7,4% wszystkich niezgodności. Udział niezgodności dla tej strefy jest najmniejszy, jednak eliminacja tego typu niezgodności może przyczynić się do poprawy spójności i przejrzystości dokumentacji projektowej.



Rysunek 3.3.2. Analiza Pareto niezgodności według kategorii RYG z podziałem na strefy A, B i C dla amortyzatorów sterowanych elektronicznie (opracowanie własne)

Analogiczną analizę przeprowadzono dla amortyzatorów konwencjonalnych, obejmującą ten sam okres badań, oraz dokonani analizy zestawienia niezgodności według faz planowania jakości zgodnych z metodologią Ten PLUS. Celem tej analizy jest umożliwienie bezpośredniego porównania rozkładu niezgodności w zależności od typu produktu – mechatronicznego i konwencjonalnego – oraz identyfikacja różnic w obszarach szczególnie podatnych na występowanie niezgodności. Tabela 3.3.3 przedstawia liczbę niezgodności przypisanych do poszczególnych kategorii RYG, zarejestrowanych na etapach od planowania projektu, poprzez rozwój i walidację, aż po produkcję dla amortyzatorów konwencjonalnych. w badanym okresie w bazie RYG zarejestrowano 48 niezgodności dla 23 projektów.

Tabela 3.3.3. Liczba niezgodności w poszczególnych fazach planowania jakości (Ten PLUS) dla amortyzatorów konwencjonalnych (opracowanie własne)

Lp.	KATEGORIA NIEZGODNOŚCI	PLANOWANIE PROJEKTU	ROZWÓJ PRODUKTU	WALIDACJA PRODUKTU i ROZWÓJ PROCESU	WALIDACJA PRODUKTU i PROCESU	PRODUKCJA
1_RYG	Niespełnienie wymagań dotyczących walidacji produktu	0	2	9	3	0
2_RYG	Niezgodności w dokumentacji projektowej (technicznej i jakościowej)	0	1	0	0	0
3_RYG	Niespełnienie wymagań materiałowych lub komponentowych	0	0	0	1	0
4_RYG	Niedotrzymanie terminów projektowania i wdrażania	2	6	9	2	0
5_RYG	Niezgodności w realizacji procesu produkcyjnego	0	1	3	3	0
6_RYG	Niespełnienie wymagań funkcjonalnych i eksploatacyjnych produktu	0	2	1	2	1

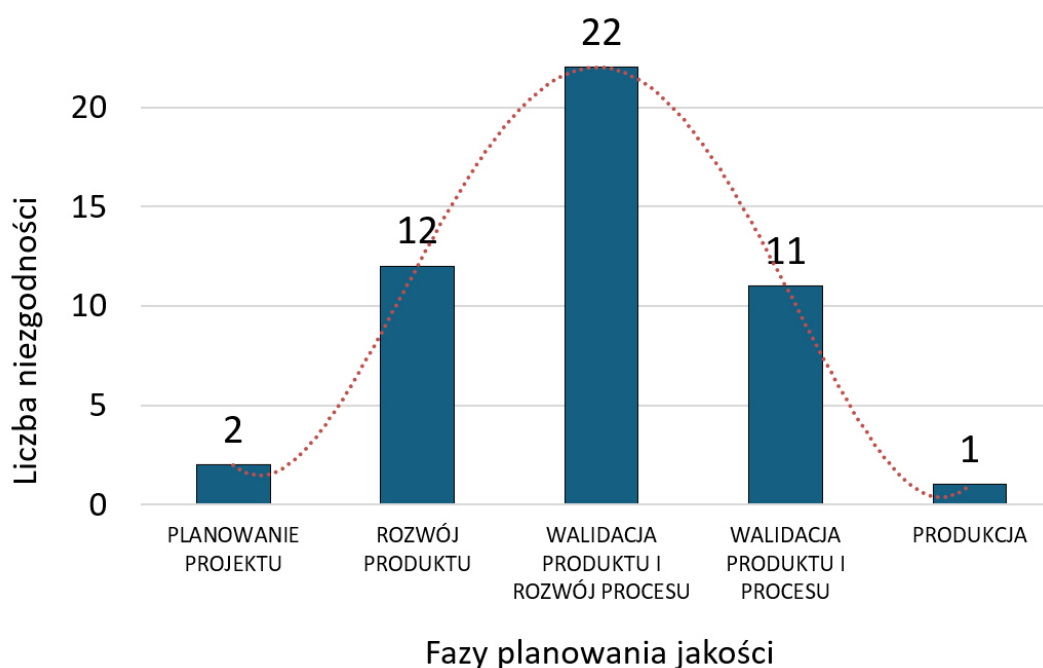
Wykres (Rysunek 3.3.3) przedstawia rozkład liczby niezgodności w poszczególnych fazach planowania jakości dla amortyzatorów konwencjonalnych z zaznaczoną linią trendu. Najwięcej niezgodności odnotowano w fazie walidacji produktu i rozwoju procesu, gdzie skoncentrowało się ponad czterdzieści procent wszystkich zgłoszeń. Etap ten obejmuje zarówno działania związane z testowaniem prototypów, jak i przygotowaniem procesów produkcyjnych, co czyni go szczególnie wrażliwym na występowanie niezgodności.

Drugim obszarem pod względem liczby zgłoszeń jest faza rozwoju produktu, w której wystąpiło blisko dwadzieścia pięć procent wszystkich niezgodności. Faza ta obejmuje projektowanie i dopracowywanie konstrukcji, także pierwsze próby materiałowe i komponentowe, które często ujawniają braki lub konieczność korekt w dokumentacji.

Znaczący udział, przekraczający jedną piątą wszystkich niezgodności, przypada na fazę walidacji produktu i procesu. Na tym etapie realizowane są działania sprawdzające zgodność produktu z wymaganiami klienta oraz wewnętrznymi normami jakościowymi, a także kontrola powtarzalności procesu produkcyjnego.

Zdecydowanie mniejszą liczbę niezgodności odnotowano w fazie planowania projektu, ich udział nie przekracza pięciu procent sumy niezgodności. Faza ta obejmuje przygotowanie podstawowych założeń technicznych i harmonogramowych, a niska liczba zgłoszeń wskazuje na ograniczoną skalę wykrywanych w tej fazie planowania jakości

Podobnie niewielką liczbę niezgodności stwierdzono w fazie produkcji, której udział również wynosi poniżej pięciu procent całości. Występujące w tej fazie zgłoszenia dotyczą głównie niezgodności eksploatacyjnych lub odchyłeń procesowych ujawnionych podczas wytwarzania wyrobów w warunkach produkcji seryjnej.

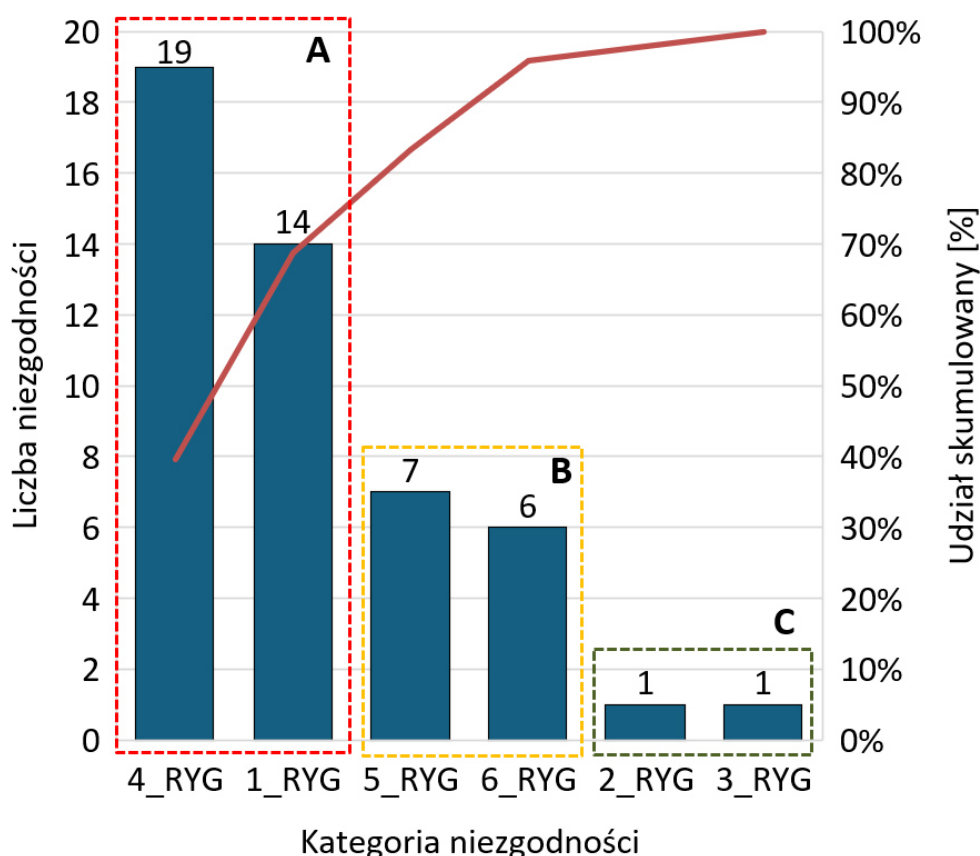


Rysunek 3.3.3. Liczba niezgodności w poszczególnych fazach planowania jakości (Ten PLUS) dla amortyzatorów konwencjonalnych z zaznaczoną linią trendu (opracowanie własne)

Wykres (Rysunek 3.3.4) przedstawia analizę Pareto liczby niezgodności według kategorii RYG dla amortyzatorów konwencjonalnych, z podziałem na strefy A, B i C. Do strefy A zaklasyfikowano dwie kategorie o największym udziale: 4_RYG – niedotrzymanie terminów projektowania i wdrażania, co stanowi 19 przypadków, czyli 39,6% wszystkich niezgodności, oraz 1_RYG – niespełnienie wymagań dotyczących walidacji produktu, co stanowi 14 przypadków, czyli 29,2% wszystkich niezgodności. Łącznie strefa A obejmuje 68,8% zgłoszeń, co wskazuje na ich dominującą rolę w analizowanym zbiorze.

Strefa B obejmuje dwie kolejne kategorie: 5_RYG – niezgodności w realizacji procesu produkcyjnego, co stanowi 7 przypadków, czyli 14,6% wszystkich niezgodności, oraz 6_RYG – niespełnienie wymagań funkcjonalnych i eksploatacyjnych produktu, co stanowi 6 przypadków, czyli 12,5% wszystkich niezgodności. Ich łączny udział wynosi około jedną czwartą wszystkich niezgodności, co oznacza, że mimo mniejszej liczby niż w strefie A, pozostają one istotnym problemem wymagającym nadzoru.

Do strefy C zaklasyfikowano kategorie o najmniejszym znaczeniu ilościowym: 2_RYG – niezgodności w dokumentacji projektowej oraz 3_RYG – niespełnienie wymagań materiałowych lub komponentowych, które łącznie stanowią poniżej pięciu procent wszystkich zgłoszeń. Ich udział jest marginalny, choć eliminacja tych przypadków może pozytywnie wpłynąć na przejrzystość dokumentacji i spójność procesów.

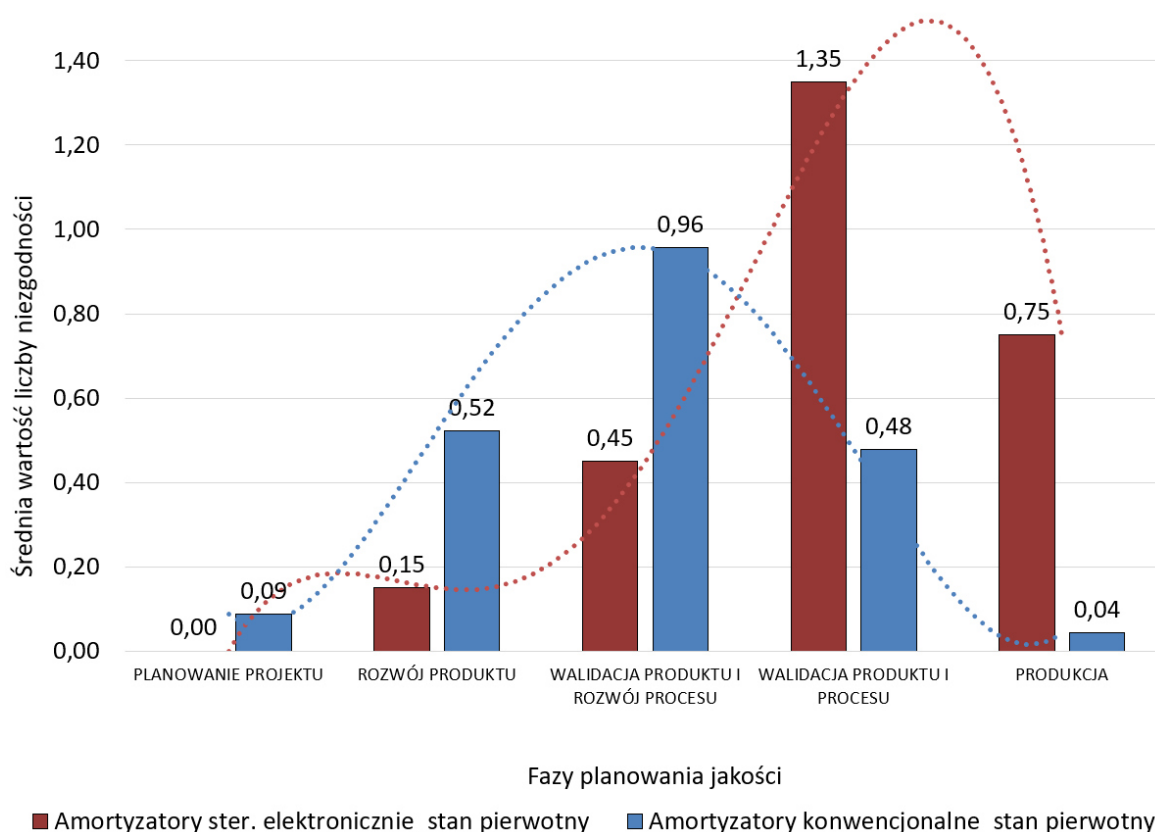


Rysunek 3.3.4. Analiza Pareto niezgodności według kategorii RYG z podziałem na strefy A, B i C dla amortyzatorów konwencjonalnych (opracowanie własne)

Wykres (Rysunek 3.3.5) przedstawia porównanie średniej wartości liczby niezgodności przypadającej na projekt w poszczególnych fazach planowania jakości według metodyki Ten PLUS dla amortyzatorów konwencjonalnych i sterowanych elektronicznie. Wykres obrazuje liczbę eskalacji w każdej z faz, natomiast linie trendu wskazują ogólny kierunek zmian oraz fazę, w której koncentruje się największa liczba niezgodności. Przeprowadzona analiza pozwala na określenie różnic w rozkładzie eskalacji niezgodności pomiędzy obydwooma typami produktów oraz identyfikacja krytycznych faz w procesie planowania jakości.

W przypadku amortyzatorów konwencjonalnych najwięcej niezgodności ujawniono w fazie walidacji produktu i rozwoju procesu, co odpowiada za ponad czterdzieści procent wszystkich zgłoszeń. Znaczący udział przypada również na fazę rozwoju produktu oraz walidacji produktu i procesu. Początkowe i końcowe etapy cyklu – planowanie projektu oraz produkcja – generują znikomą liczbę eskalacji, pozostając obszarami najmniej obciążonymi.

Dla amortyzatorów sterowanych elektronicznie maksimum liczby eskalacji został przesunięty na fazę walidacji produktu i procesu, a dodatkowo utrzymuje się również na wysokim poziomie w produkcji. Taka sytuacja jest szczególnie krytyczna, ponieważ zgodnie z tzw. regułą dziesięciokrotności koszt eliminacji niezgodności rośnie wielokrotnie wraz z przesuwaniem się ich wykrycia w stronę końcowych etapów cyklu życia produktu. Niezgodności wykryte w produkcji seryjnej mogą generować nawet dziesięciokrotnie wyższe koszty niż te same niezgodności zdiagnozowane na etapie projektowania. Oznacza to, że późna eskalacja nie tylko obciąża harmonogram i budżet projektu, lecz także znacząco zwiększa ryzyko naruszenia wymagań jakościowych oraz bezpieczeństwa produktu.

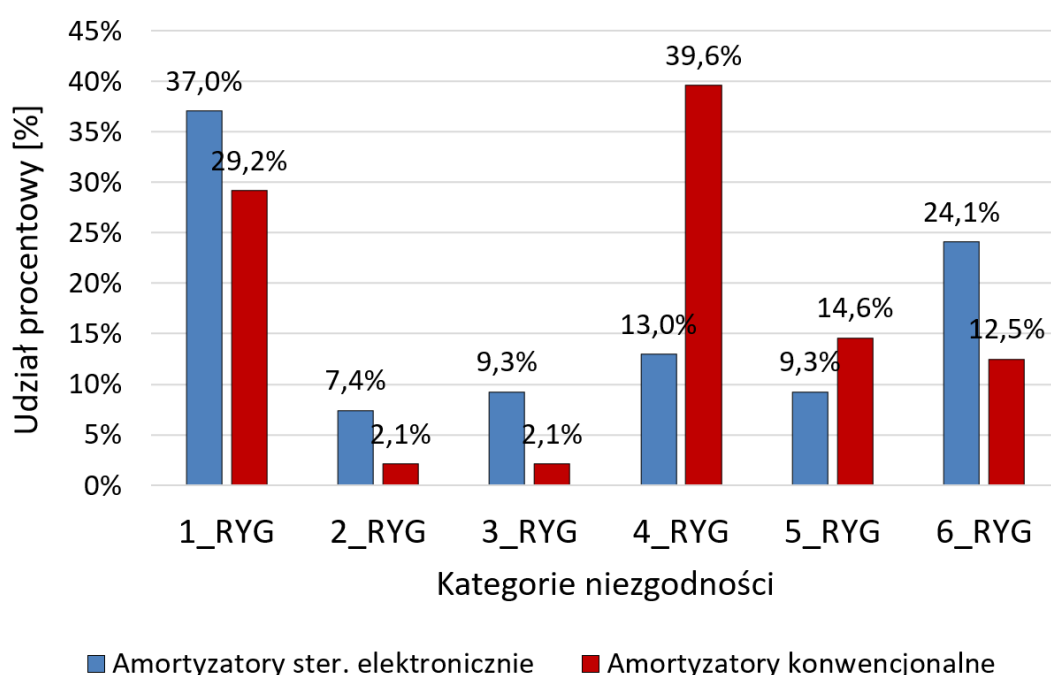


Rysunek 3.3.5. Porównanie średniej wartości liczby niezgodności na projekt w poszczególnych fazach planowania jakości (Ten PLUS) dla amortyzatorów konwencjonalnych i sterowanych elektronicznie z zaznaczoną linią trendu (opracowanie własne)

W zakresie doskonalenia procesu planowania jakości, kluczowym zaleceniem jest obniżenie wartości liczby eskalacji w końcowych fazach oraz przesunięcie szczytu ich występowania w lewo, tzn. na wcześniejsze fazy planowania jakości.

Wykres (Rysunek 3.3.6) przedstawia porównanie udziału procentowego niezgodności w poszczególnych kategoriach RYG dla amortyzatorów konwencjonalnych i sterowanych elektronicznie. Różnice w strukturze niezgodności pomiędzy dwoma typami produktów są wyraźnie widoczne i pozwalają na sformułowanie kilku spostrzeżeń.

W amortyzatorach sterowanych elektronicznie dominującą kategorią niezgodności jest 1_RYG – niespełnienie wymagań dotyczących walidacji produktu, która obejmuje 37,0% wszystkich przypadków. w produktach konwencjonalnych udział tej kategorii jest niższy i wynosi 29,2%, co wskazuje, że walidacja ma zdecydowanie większe znaczenie jako źródło niezgodności w przypadku bardziej złożonych konstrukcji mechatronicznych. Odmienna sytuacja dotyczy niezgodności 4_RYG – niedotrzymania terminów projektowania i wdrażania. Dla amortyzatorów konwencjonalnych jest to najlichniesza kategoria, odpowiadająca za 39,6% wszystkich niezgodności, podczas gdy w amortyzatorach sterowanych elektronicznie jej udział to jedynie 13,0%. Oznacza to, że kwestie związane z terminowością realizacji projektów są szczególnie istotne w przypadku produktów o klasycznej konstrukcji.



Rysunek 3.3.6. Udział procentowy niezgodności w poszczególnych kategoriach niezgodności RYG dla amortyzatorów konwencjonalnych i sterowanych elektronicznie (opracowanie własne)

Kolejną kategorią niezgodności różnicującą oba typy produktów jest 6_RYG – niespełnienie wymagań funkcjonalnych i eksploatacyjnych produktu. w amortyzatorach sterowanych elektronicznie stanowi ona 24,1% wszystkich niezgodności, co czyni ją drugą kategorią pod względem udziału. w produktach konwencjonalnych jej znaczenie jest zdecydowanie mniejsze – 12,5% , co wskazuje, iż w przypadku bardziej zaawansowanych rozwiązań produktów (mechatronicznych) częściej dochodzi do problemów związanych z zapewnieniem odpowiedniej funkcjonalności i trwałości w warunkach eksploatacyjnych.

Warto także zwrócić uwagę na kategorię 5_RYG – niezgodności w realizacji procesu produkcyjnego. Jej udział jest wyższy dla produktów sterowanych elektronicznie (14,6%) niż konwencjonalnych (9,3%). z kolei 2_RYG – niezgodności w dokumentacji projektowej oraz niezgodność 3_RYG – niespełnienie wymagań materiałowych lub komponentowych odgrywają

drugorzędną rolę w obu przypadkach, jednak w amortyzatorach sterowanych elektronicznie ich udział (odpowiednio 7,4% i 9,3%) jest wyraźnie większy niż w konwencjonalnych (odpowiednio 2,1% i 2,1%).

Przeprowadzone badania i analizy wskazują, że w przypadku amortyzatorów sterowanych elektronicznie dominują niezgodności związane z walidacją i funkcjonalnością produktu, natomiast w amortyzatorach konwencjonalnych największy udział mają niezgodności wynikające z opóźnień w projektowaniu i wdrażaniu.

Analiza zgromadzonych danych wykazała, że rozkład niezgodności w procesie planowania jakości znacząco różni się w zależności od typu produktu. W amortyzatorach konwencjonalnych największe natężenie eskalacji pojawia się w fazach rozwojowych i przygotowania procesu, natomiast w produktach sterowanych elektronicznie kulminacja niezgodności następuje w końcowych fazach – podczas walidacji produktu i procesu oraz w produkcji. Oznacza to, że w przypadku produktów klasycznych problemy ujawniają się wcześniej, gdy konstrukcja i proces są jeszcze kształtowane, natomiast w produktach mechatronicznych problemy występują w późniejszym momencie, kiedy możliwości wprowadzania zmian są ograniczone, a ich koszty znacznie wyższe. Wykazane różnice pozwalają zdefiniować ograniczenia dotychczas stosowanych procedur i wskazują na konieczność opracowania rozwiązań, które odpowiadają specyfice poszczególnych faz rozwoju produktu i procesu mając na uwadze złożoność produktu (jego charakterystykę).

W oparciu o przeprowadzoną analizę niezgodności w procesie planowania jakości oraz przyjętą w organizacji strategię planowania jakości w ramach niniejszego projektu doktorskiego podjęto prace związane z opracowaniem i wdrożeniem zestawu instrumentów planowania jakości, co ma się przełożyć na eliminację eskalacji niezgodności w późnych fazach planowania jakości a także obniżyć liczbę ich występowania.

3.4. Zakres i ograniczenia badań

Niniejszy rozdział przedstawia zakres i ograniczenia dotyczące realizacji badań. Określono w nim główne obszary tematyczne, które zostały objęte analizą, a także warunki towarzyszące ich realizacji. Wskazano również czynniki, które kształtowały sposób interpretacji wyników badań oraz na możliwość ich uogólnienia.

Zakres przeprowadzonych badań obejmował okres czasu realizacji rozprawy doktorskiej, tj. lata 2021–2025. Praca była realizowana w Tenneco Automotive Eastern Europe, w dziale rozwoju produktu, co zapewniło dostęp do przedmiotu badań. Powyższe umożliwiło przeprowadzenie badań i analiz w oparciu o rzeczywiste dane i procedury stosowane w praktyce inżynierskiej.

Badania objęły wszystkie fazy planowania jakości zgodnie z wdrożoną metodologią APQP – od wstępnego planowania programu, poprzez rozwój produktu i rozwój procesu, aż po walidację. Fazy analizowano koncentrując się na identyfikacji ryzyk, ocenie dokumentacji projektowej oraz skuteczności stosowanych instrumentów planowania jakości. Przedmiotem analiz były amortyzatory sterowane elektronicznie, natomiast amortyzatory konwencjonalne stanowiły punkt odniesienia do uzyskanych danych, co pozwoliło określić różnice w odniesieniu do stopnia złożoności konstrukcji, zakresie wymagań oraz potencjalnych ryzyk wynikających z niezgodności charakterystycznych dla rzeczywistych uwarunkowań projektowo-produkcyjnych.

Warunki realizacji badań determinowała specyfika jednostki, w której zostały przeprowadzone. Tenneco Automotive Eastern Europe posiada certyfikat na wdrożony system zarządzania zgodny ze standardem IATF 16949, potwierdzający spełnianie wymagań jakościowych obowiązujących w branży motoryzacyjnej. Równocześnie jednostka jest objęta certyfikacją systemu zarządzania jakością zgodnego z normą ISO 9001. Powyższe warunkuje funkcjonowanie przedsiębiorstwa w ramach prowadzonego nadzoru przez jednostki certyfikujące i stanowi potwierdzenie realizacji procesów mających za zadanie spełnienie określonych w standardach wymagań w tym dotyczących planowania jakości.

Istotnym elementem warunków prowadzenia badań był wewnętrzny system planowania jakości Ten PLUS, integrujący wymagania normatywne z praktycznymi procedurami projektowymi i wdrożeniowymi stosowanymi w przedsiębiorstwie. Powyższe warunkuje realizację badań w środowisku o wysokim poziomie dojrzałości systemowej, gwarantującym spójność działań jakościowych oraz zgodność z międzynarodowymi standardami w całym cyklu rozwoju i industrializacji produktu.

Ograniczenia badań wynikały w dużej mierze z uwarunkowań organizacyjnych i specyfiki prowadzonego procesu planowania jakości. Ze względu na poufność danych przedsiębiorstwa nie ujawniono w niniejszej pracy informacji związanych z aspektami finansowymi oraz szczegółowymi rozwiązaniami produktowymi i procesowymi, które stanowią know how

organizacji. Ograniczenie to miało wpływ na zakres prezentowanych wyników, które obejmują jedynie dane istotne z punktu widzenia analizy technicznej i jakościowej.

W trakcie realizacji badań nastąpiła także zmiana wskaźników stosowanych w dziale rozwoju produktu przedsiębiorstwa. Początkowo analizowano liczbę eskalacji w przeliczeniu na miesiąc, jednak w dalszej perspektywie przyjęto nową metodykę, opartą na czasie deeskalacji danej niezgodności. Zmiana ta uniemożliwiła wykorzystanie KPI jako spójnego miernika porównawczego w całym okresie badań, dlatego wskaźnik ten nie został włączony do analizy.

Na uzyskane wyniki badań wpływ ma czynnik ludzki. Stopień doświadczenia pracowników, ich zaangażowanie oraz poziom zrozumienia stosowanych narzędzi i procesów mogły różnicować sposób wypełniania badanej dokumentacji oraz kształtować skuteczność identyfikacji niezgodności. Zróżnicowanie to zostało potraktowane jako naturalny element badań prowadzonych w środowisku przemysłowym, gdzie kompetencje i praktyka zespołów inżynierskich nie są jednorodne. Ze względu na nieznaczny poziom rotacji pracowników w dziale rozwoju produktu wpływ czynnika ludzkiego został pominięty i nie był badany.

Kolejnym ograniczeniem badań była struktura procesów zarządzania w organizacji. Część procedur i standardów ma charakter globalny i nie podlega dowolnym modyfikacjom na poziomie lokalnym. W konsekwencji zaproponowane autorskie rozwiązania ujęte w niniejszym doktoracie dotyczyły wyłącznie obszarów, w których możliwe było zastosowanie rozwiązań eksperymentalnych, przy jednoczesnym zachowaniu zgodności z globalnymi wytycznymi Tenneco oraz wymaganiami OEM.

Istotnym ograniczeniem badań był horyzont czasowy badań. Z praktyki przemysłowej wynika, iż średni czas realizacji projektu rozwojowego trwa 3 lata. W zakresie przeprowadzonych badań analizowano projekty o różnym czasie ich rozpoczęcia w wyniku czego zebrane dane pochodziły z różnych faz planowania jakości.

3.5. Metodyka badawcza

Metodyka badań została przyjęta tak, aby połączyć analizę teoretyczną z praktyczną weryfikacją w środowisku przemysłowym. Uwzględnia ona zarówno metody jakościowe, jak i ilościowe badań, co pozwala uzyskać pełny opis zjawisk zachodzących w procesie rozwoju i industrializacji produktu. Dobór metod badawczych umożliwiło najpierw zidentyfikowanie luki badawczej i opisanie obecnego stanu procesów, a następnie przeprowadzenie eksperymentalnej oceny skuteczności zmodyfikowanych instrumentów planowania jakości. Szczegółowy opis zastosowanych metod badawczych przedstawiono w kolejnych akapitach.

Krytyczna analiza tekstów źródłowych została zastosowana w celu uporządkowania wiedzy na temat metod i narzędzi planowania jakości oraz ich zastosowania w procesie rozwoju i industrializacji produktów. Obejmowała ona przegląd literatury naukowej, norm oraz wytycznych branżowych, co pozwoliło na zidentyfikowanie istniejących podejść, określenie ich ograniczeń oraz wskazanie obszarów wymagających dalszych badań i usprawnień. Dzięki temu możliwe było precyzyjniejsze sformułowanie problemu badawczego oraz określenie kierunku analiz.

Metoda analizy i konstrukcji logicznej została wykorzystana do systematycznego opisu i dekompozycji procesu rozwoju oraz industrializacji produktów mechatronicznych. Umożliwiła ona wskazanie zależności pomiędzy poszczególnymi elementami procesu, a także porównanie ich z rozwiązaniami stosowanymi w przypadku produktów konwencjonalnych. Zastosowanie tej metody pozwoliło na wyodrębnienie specyficznych różnic w zakresie wymagań, ryzyk oraz potencjalnych niezgodności, co stworzyło podstawy do dalszych działań doskonalących.

Metoda badania dokumentów została wykorzystana do analizy materiałów związanych z planowaniem jakości w procesach rozwoju i industrializacji. Obejmowała ona zarówno dokumenty normatywne, takie jak procesu APQP czy wytyczne branżowe. Istotnym źródłem danych była baza eskalacji Red/Yellow/Green (RYG), która dostarczała informacji o rodzaju i liczbie niezgodności pojawiających się w projektach. Dodatkowo przeanalizowano wdrożony w organizacji proces planowania jakości Ten PLUS, co umożliwiło porównanie jego struktury i skuteczności z klasycznym podejściem APQP. Analiza tych materiałów pozwoliła wskazać podobieństwa i różnice pomiędzy podejściem teoretycznym a praktyką inżynierską, a także uchwycić obszary wymagające doskonalenia do specyfiki produktów mechatronicznych. Dzięki temu możliwe było wyznaczenie kierunków usprawnień w zakresie stosowania instrumentów planowania jakości.

Metoda eksperymentalna została zastosowana w celu praktycznej weryfikacji skuteczności zmodyfikowanych instrumentów planowania jakości. Eksperyment polegał na opracowaniu i wdrożeniu wybranych rozwiązań w rzeczywistych projektach rozwoju i industrializacji amortyzatorów sterowanych elektronicznie oraz obserwacji ich wpływu na przebieg procesów. Do oceny zastosowano kryteria, obejmujące m.in. redukcję liczby niezgodności oraz liczby ryzyk niezgodności eskalowanych w procesie Red/Yellow/Green (przed i po zastosowaniu

opracowanych i wdrożonych rozwiązań). Zastosowanie tej metody pozwoliło na uzyskanie danych empirycznych, które umożliwiły obiektywną ocenę wartości wprowadzonych zmian i potwierdzenie ich wpływu na doskonalenie procesu planowania jakości.

3.6. Etapy realizacji badań

Badania w ramach niniejszego doktoratu były prowadzone w okresie czteroletnim, od października 2021 roku do maja 2025 roku, zgodnie z harmonogramem określonym w Indywidualnym Planie Badawczym. W tabeli 3.6.1 przedstawiono harmonogram i zakres badań.

Tabela 3.6.1. Zakres i kamienie milowe badań (opracowanie własne)

ETAP 1	od 10.2021 do 02.2022
- analiza teoretyczna instrumentów planowania jakości stosowanych w rozwoju i industrializacji produktów, - przegląd literatury naukowej oraz źródeł branżowych, - identyfikacja luki badawczej w obszarze planowania jakości, - opracowanie szczegółowych celów badawczych.	
ETAP 2	od 01.2022 do 06.2023
- analiza eskalacji ryzyk związanych z wystąpieniem niezgodności w procesie RYG (Red/Yellow/Green) wdrożonym w organizacji, - identyfikacja niezgodności w procesie rozwoju i industrializacji dla wybranego typu produktu, - analiza faz procesu planowania jakości pod kątem występowania niezgodności.	
ETAP 3	od 01.2022 do 04.2023
- opracowanie metodyki badań, - definiowanie kryteriów pomiaru skuteczności wdrożonych rozwiązań,	
ETAP 4	od 10.2022 do 12.2024
- zbieranie danych potrzebnych do oceny skuteczności wdrożonych rozwiązań, - implementacja opracowanych instrumentów planowania - gromadzenie danych empirycznych do weryfikacji hipotez badawczych	
ETAP 5	od 10.2023 do 12.2023
- przeprowadzenie wstępnej analizy zebranych danych, - ocena skuteczności zaproponowanych rozwiązań, - identyfikacja obszarów wymagających dalszego dopracowania, - wprowadzenie korekt do wdrożonych instrumentów na podstawie uzyskanych wyników	
ETAP 6	od 01.2024 do 01.2025
- weryfikacja skuteczności wdrożonych rozwiązań, z wykorzystaniem wcześniej zdefiniowanych kryteriów oceny, - doskonalenie opracowanych rozwiązań.	
ETAP 7	od 10.2024 do 03.2025
- analiza różnic w procesach planowania jakości przed i po implementacji zmian, - ocena wartości wprowadzonych usprawnień, - ocena wpływu zmian na osiągnięcie założonych celów badawczych,	
ETAP 8	od 03.2024 do 05.2025
- opracowanie i uporządkowanie wyników badań, - formułowanie wniosków końcowych, - przygotowanie rozprawy doktorskiej,	

Nakładanie się poszczególnych etapów badań nie jest zjawiskiem przypadkowym, lecz wynika z przyjętej logiki procesu badawczego oraz złożoności analizowanego obszaru. Część działań musiała być prowadzona równolegle, aby możliwe było zachowanie spójności pomiędzy opracowywaną metodologią a weryfikacją praktyczną. Przykładowo, definiowanie kryteriów oceny skuteczności (etap trzeci) naturalnie łączyło się z początkową implementacją instrumentów planowania jakości (etap czwarty), co pozwalało na bieżąco weryfikować ich adekwatność i wprowadzać korekty. Podobnie analiza danych (etap piąty) wymagała już zgromadzonych rezultatów z etapu czwartego, ale jednocześnie dostarczała wskazówek dla dalszej walidacji i porównania procesów (etapy szósty i siódmy). Takie częściowe przenikanie się faz umożliwiało tworzenie zamkniętych pętli doskonalenia oraz zgodnie z logiką APQP, gdzie proces rozwoju i industrializacji wymaga iteracyjnego podejścia. Dzięki temu uzyskano większą elastyczność i spójność badań, a także zapewniono, że wypracowane rozwiązania są zarówno teoretycznie uzasadnione, jak i empirycznie zweryfikowane.

3.7. Projektowanie i wdrożenie instrumentów planowania jakości

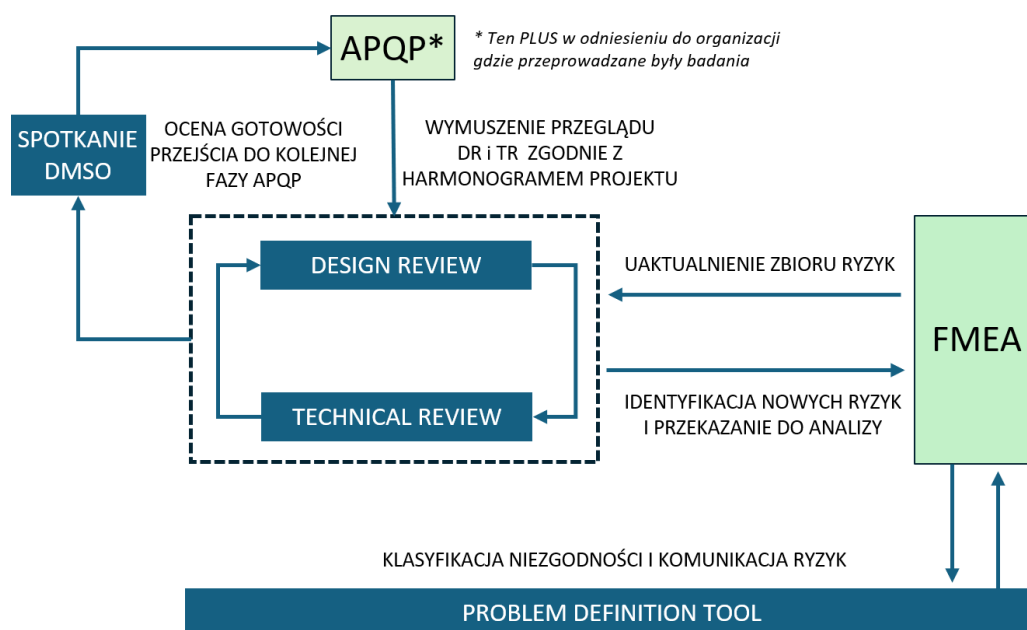
W odpowiedzi na zidentyfikowane trudności w procesie planowania jakości produktów mechatronicznych opracowano lub zmodyfikowano istniejące trzy instrumenty wspierające pracę zespołów projektowych: Design Review, Technical Review oraz Problem Definition Tool.

Design Review pozwala na systematyczne sprawdzenie dokumentacji technicznej, co ułatwia szybkie diagnozowanie braków i niezgodności jeszcze na etapie projektowania.

Technical Review to proces oceny projektu od strony konstrukcyjnej, obejmujący weryfikację spójności z wymaganiami klienta oraz obowiązującymi standardami technologicznymi.

Problem Definition Tool porządkuje proces definiowania i komunikowania niezgodności, zapewniając ich jednoznaczną klasyfikację oraz usprawniając podejmowanie decyzji o działaniach korygujących. Powyższe trzy instrumenty zostały powiązane z analizą FMEA.

Jak pokazano na rysunku 3.7.1, instrumenty te tworzą spójny system w zakresie planowania jakości, w którym wyniki przeglądów dotyczących produktów i procesów i analiza ryzyk są ze sobą ściśle powiązane. Funkcjonujący w przedsiębiorstwie system Ten PLUS pełni rolę nadrzędną – wymusza przeprowadzanie przeglądów i poprzez proces DMSO (Design Manufacturing Sign Off) stanowi podstawę do oceny gotowości projektu do wejścia do kolejnej fazy planowania jakości. Zidentyfikowane podczas zastosowania Design Review i Technical Review niezgodności oraz ryzyka są transferowane do analizy FMEA, gdzie zostają zapisane i poddawane analizie. z kolei Problem Definition Tool wspiera ten proces planowania jakości, zapewniając przejrzystość i jednoznaczność zbierania danych i analizy informacji.



Rysunek 3.7.1. Integracja opracowanych instrumentów planowania jakości w procesie rozwoju produktu (opracowanie własne)

Badania własne koncentrowały się na ocenie skuteczności i efektywności zastosowania wskazanych narzędzi w praktyce inżynierskiej. Analizowano liczbę oraz rodzaj niezgodności wykrywanych podczas przeglądów, a także stopień uzupełnienia dostępnych informacji w dokumentacji projektowej i technicznej. Szczególną uwagę poświęcono temu, jak kompletność danych wpływała na możliwość całkowitego usunięcia zidentyfikowanych niezgodności. Istotnym elementem badań była również ocena jakości komunikacji i klasyfikacji niezgodności przy wykorzystaniu Problem Definition Tool, co pozwoliło zweryfikować jego rolę we wspieraniu spójności i przejrzystości działań projektowych. Dzięki temu możliwe było określenie realnego wpływu opracowanych narzędzi na ograniczenie liczby niezgodności w procesie rozwoju i industrializacji amortyzatorów sterowanych elektronicznie.

3.7.1 Wprowadzenie do instrumentu Design Review

W procesie rozwoju produktu i procesu dokumentacja techniczna stanowi fundament i kryterium wszystkich planowanych działań konstrukcyjnych, procesowych oraz jakościowych. Zgodnie z wymaganiami IATF 16949:2016 (pkt 7.5.3.2.2) organizacja powinna posiadać udokumentowany proces zarządzania dokumentacją techniczną, obejmujący przegląd, rozpowszechnienie i wdrożenie wszystkich norm oraz specyfikacji technicznych wraz z ich zmianami. Wymóg ten oznacza konieczność systematycznego nadzoru nad aktualnością i spójnością dokumentacji technicznej w procesie rozwoju produktu i procesu – od fazy planowania, przez projektowanie i walidację, aż do uruchomienia produkcji. Ma to kluczowe znaczenie dla planowania jakości oraz zapewnienia zgodności z wymaganiami klienta.

Analiza zagadnień ujawnianych podczas cotygodniowych spotkań przeglądowych w ramach procesu Red/Yellow/Green (RYG) – cyklicznych, interdyscyplinarnych spotkań prowadzonych w dziale rozwoju produktu (Application Engineering), których celem jest monitorowanie statusu projektów, identyfikacja problemów technicznych oraz ocena ryzyka wpływu tych problemów na harmonogram i jakość produktu – wykazała istotny wzrost liczby przypadków, których źródłem były niezgodności w dokumentacji technicznej dla projektów obejmujących rozwój i industrializację amortyzatorów sterowanych elektronicznie oraz powiązanych z nimi komponentów. Zjawisko to było szczególnie widoczne w porównaniu do projektów dotyczących amortyzatorów konwencjonalnych. Najczęściej identyfikowane niezgodności dotyczyły braku spójności pomiędzy poszczególnymi elementami danych projektowych, niekompletności informacji konstrukcyjnych oraz rozbieżności względem standardów wewnętrznych i wymagań klienta (rozdział 3.7.3).

W konsekwencji organizacja Tenneco (Tenneco Automotive Eastern Europe) podjęła decyzję o konieczności usprawnienia tego obszaru, a działania naprawcze zostały włączone do części wdrożeniowej niniejszego projektu doktorskiego. Jednym z kluczowych elementów tego planu było opracowanie i wdrożenie narzędzia Design Review (przegląd dokumentacji projektowej), które umożliwia systematyczną i ustrukturyzowaną weryfikację dokumentacji technicznej. Narzędzie to, opracowane początkowo z myślą o dokumentacji dla amortyzatorów

sterowanych elektronicznie, pozwala na identyfikację oraz eliminację niezgodności krytycznych, rozumianych jako uchybienia mogące wpływać bezpośrednio na spełnienie kluczowych funkcji produktu, bezpieczeństwo użytkowania lub zgodność z wymaganiami klienta. W wyniku jego zastosowania istotne błędy mogą zostać wyeliminowane jeszcze przed wejściem do realizacji fazy 4 wg APQP (walidacja produktu i procesu), co znacząco ogranicza ryzyko ich późniejszego, kosztownego ujawnienia.

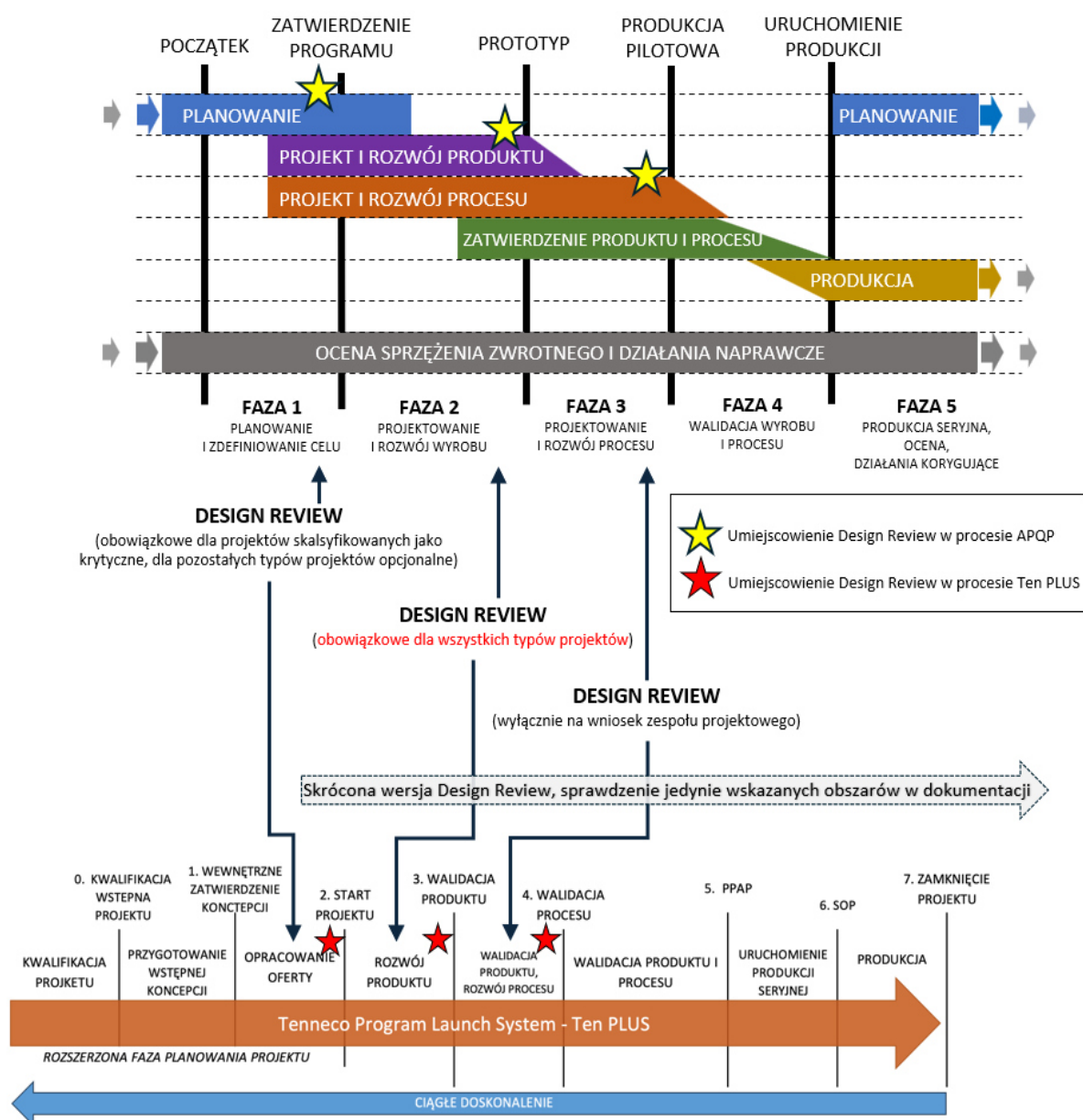
Zakres stosowania Design Review stopniowo rozszerzano – początkowo obejmował on wyłącznie projekty amortyzatorów elektronicznych, a następnie został adaptowany również do obszaru amortyzatorów konwencjonalnych. Obecnie w organizacji funkcjonuje już druga wersja tego narzędzia, której wprowadzenie było odpowiedzią na doświadczenia z pierwszych wdrożeń oraz potrzeby zgłaszane przez zespoły projektowe. Szczegółowe różnice pomiędzy wersją 1.0 a 2.0 zostaną opisane w kolejnym podrozdziale.

Standard APQP stanowi wzorcową metodologię planowania jakości stosowaną w przemyśle motoryzacyjnym. W Tenneco Gliwice został zaimplementowany jako proces TenPLUS, adaptujący założenia APQP do rozwoju amortyzatorów konwencjonalnych oraz sterowanych elektronicznie. Design Review funkcjonuje w tym procesie jako narzędzie planowania jakości, weryfikujące poprawność i spójność dokumentacji technicznej w kluczowych fazach rozwoju produktu. Zgodnie ze schematem przedstawionym na rysunku 3.7.1.1, Design Review w procesie TenPLUS stosowane jest w następujących fazach:

- **Faza planowania projektu** – w projektach sklasyfikowanych jako krytyczne, Design Review wykorzystywane jest do wczesnej weryfikacji kompletności i spójności wymagań wejściowych. Jego celem jest identyfikacja potencjalnych niespójności jeszcze przed rozpoczęciem właściwego rozwoju produktu.
- **Faza rozwoju produktu** – w tym etapie przegląd ma charakter obowiązkowy i obejmuje pełną weryfikację dokumentacji projektowej: modeli CAD, rysunków 2D, BOM-ów oraz specyfikacji materiałowych. Głównym zadaniem jest zapewnienie zgodności dokumentacji ze standardami wewnętrznymi i wymaganiami klienta oraz eliminacja źródeł niezgodności przed przejściem do walidacji procesów.
- **Faza walidacji produktu i rozwoju procesu** – przeprowadzenie przeglądu nie jest obligatoryjne, jednak narzędzie może być użyte na wniosek zespołu projektowego, szczególnie w projektach o podwyższonym ryzyku lub gdy wcześniejsze przeglądy wykazały istotne niezgodności wymagające ponownej oceny.
- **Skrócona wersja Design Review** – może być uruchomiona na każdym etapie cyklu projektu, jeśli pojawią się nowe dane wejściowe lub zmienione założenia konstrukcyjne powodujące konieczność aktualizacji dokumentacji. W takim przypadku przegląd skupia się na wybranych obszarach wskazanych przez zespół projektowy.

Tak zdefiniowane umiejscowienie Design Review zapewnia spójność z logiką postępowania określoną w APQP, a jednocześnie dostosowanie do realiów produkcyjnych Tenneco. Narzędzie

to pełni funkcję kluczowego elementu planowania jakości, integrując wymagania standardów branżowych z potrzebami organizacji.



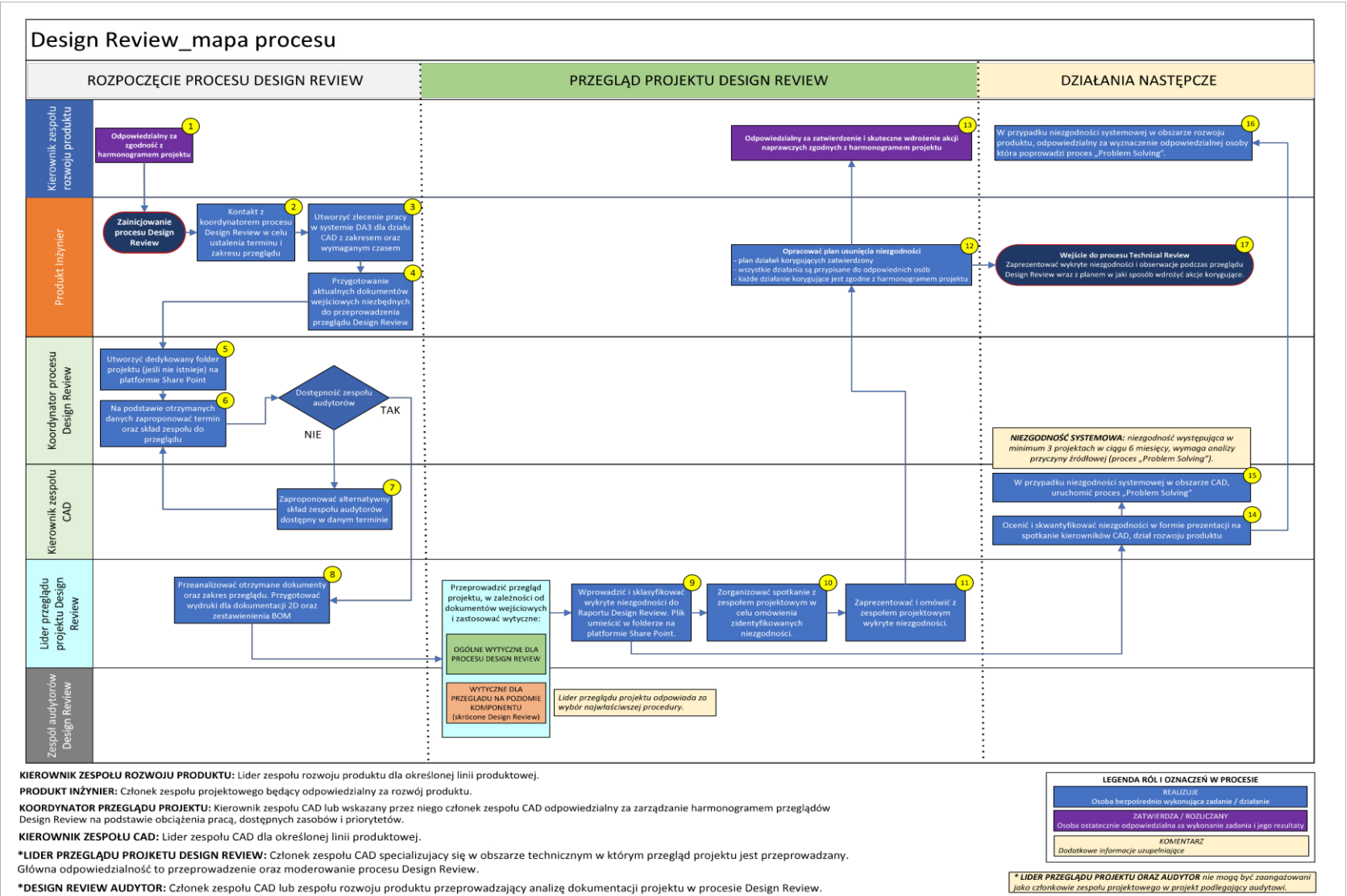
Rysunek 3.7.1.1 Umieszczenie Design Review w procesie planowania jakości produktu i procesu wg APQP oraz Ten PLUS (opracowanie własne bazujące na APQP i Ten PLUS)

3.7.2 Charakterystyka Design Review

Przegląd dokumentacji projektowej (Design Review) stanowi ustrukturyzowany proces, którego celem jest zapewnienie spójności, kompletności oraz zgodności danych technicznych wykorzystywanych w projektach rozwojowych. Od początku jego wdrożenia w organizacji przyjęto zasadę, że proces odbywa się w formie stacjonarnej, z udziałem interdyscyplinarnego

zespołu. Doświadczenia z pierwszych przeglądów jednoznacznie wskazały, że taka forma pracy sprzyja większej efektywności analizy, ułatwia bieżącą dyskusję oraz pozwala na szybsze wyjaśnianie wątpliwości pomiędzy uczestnikami.

W celu usystematyzowania działań została opracowana mapa procesu Design Review 2.0 (Rysunek 3.7.1.2.), która przedstawia sekwencję czynności realizowanych od momentu inicjacji przeglądu, poprzez przygotowanie i analizę dokumentacji, aż do zamknięcia procesu oraz ewentualnego uruchomienia procedury „Problem Solving”. Schemat ten obrazuje przepływ informacji pomiędzy uczestnikami oraz odpowiedzialność za kolejne etapy przeglądu.



Rysunek 3.7.1.2. Mapa procesu Design Review 2.0 (opracowanie własne)

Uzupełnieniem mapy procesu jest tabela (Tabela 3.7.2.1.) charakterystyki wejść i wyjść, która pozwala określić dane niezbędne do realizacji poszczególnych kroków oraz oczekiwane rezultaty. Numery poszczególnych pozycji w tabeli odpowiadają numerom oznaczonym na mapie procesu (Rysunek 3.7.1.2).

Tabela 3.7.2.1. Wejścia i wyjścia procesu Design Review 2.0 (opracowanie własne)

Nr	Charakterystyka działań	Wejścia	Wyjścia
1	Określić odpowiedzialności za zgodność z harmonogramem projektu	Harmonogram projektu, wymagania klienta	Zainicjowany proces Design Review zgodnie z harmonogramem projektu
2	Kontakt z koordynatorem procesu	Harmonogram, zakres projektu	Ustalony termin i zakres przeglądu
3	Utworzyć zlecenie pracy w systemie DA3	Ustalony termin i zakres, wymagania CAD	Zlecenie pracy w systemie planowania pracy CAD
4	Przygotowanie dokumentów wejściowych	Aktualna dokumentacja CAD/BOM	Komplet dokumentów do przeglądu Design Review
5	Utworzyć dedykowany folder projektu na platformie SharePoint	Zlecenie DR, zakres Design Review	Folder projektu na platformie SharePoint z dostępem dla zespołu projektowego
6	Zaproponować termin i skład zespołu do przeglądu	Dane projektu, dostępność zasobów audytorów	Propozycja terminu i składu zespołu audytorów
7	Zaproponować alternatywny skład audytorów	Brak dostępności pierwotnego zespołu audytorów	Alternatywny skład audytorów
8	Przeanalizować dokumentację techniczną	Dokumentacja CAD, BOM	Wydruki 2D i zestawienia BOM
9	Wprowadzić i sklasyfikować niezgodności do Raportu DR	Wyniki przeglądu, dokumentacja wejściowa	Raport DR z wpisanymi niezgodnościami (SharePoint)
10	Zorganizować spotkanie z zespołem projektowym	Raport DR, lista niezgodności	Spotkanie projektowe zaplanowane
11	Zaprezentować i omówić niezgodności z zespołem	Raport DR, zidentyfikowane niezgodności	Omówione i zatwierdzone niezgodności przez zespół projektowy
12	Opracować plan usunięcia niezgodności	Raport DR z niezgodnościami	Plan działań korygujących zatwierdzony, przypisane osoby odpowiedzialne, harmonogram działań ustalony
13	Zatwierdzić i wdrożyć akcje naprawcze zgodne z harmonogramem	Plan działań korygujących, harmonogram projektu	Wdrożone i potwierdzone działania korygujące, aktualizacja statusu projektu
14	Ocenić i skwantyfikować niezgodności w formie prezentacji	Raport DR, lista niezgodności, wyniki działań korygujących	Prezentacja na spotkanie kierownictwa CAD / działu rozwoju
15	Uruchomić proces „Problem Solving” dla niezgodności systemowej	Dane z prezentacji, zidentyfikowana niezgodność systemowa	Proces „Problem Solving” uruchomiony, analiza przyczyn źródłowych
16	Wyznaczyć odpowiedzialną osobę do prowadzenia „Problem Solving” w obszarze rozwoju produktu	Niezgodność systemowa w obszarze rozwoju produktu	Osoba odpowiedzialna za proces „Problem Solving”
17	Wejście do procesu Technical Review – prezentacja niezgodności i planu działań	Raport DR, plan działań korygujących, obserwacje z DR	Przekazane dane wejściowe do Technical Review, plan wdrożenia akcji korygujących

W ramach przygotowań do przeglądu dokumentacja projektowa jest drukowana, a następnie każdy zapis i parametr konstrukcyjny podlega szczegółowej weryfikacji. Praca na wersjach papierowych niesie ze sobą istotne korzyści – umożliwia równoczesne zaangażowanie wielu osób w analizę, pozwala na swobodne nanoszenie uwag oraz sprzyja lepszemu skupieniu na treści dokumentacji bez zakłóceń wynikających z pracy w środowisku cyfrowym. Niezgodności oraz elementy wymagające szczególnej uwagi są oznaczane kolorowymi flamastrami według ustalonego klucza oraz transferowane przez lidera Design Review do arkusza *Design Review Output file* (Rysunek 3.7.2.1)

Numer komponentu lub złożenia zespołu:		Dane audytorów:
Nazwa komponentu lub złożenia:		
Faza projektu:		Dane Zespołu Projektowego:
Data przeglądu:		

ZESPÓŁ AUDYTORÓW					ZESPÓŁ PROJEKTOWY	STATUS
#	Ocena Niezgodności	Numer Rysunku	Obszar na Rysunku (A1/A2/...)	Opis Niezgodności	Uwagi Zespołu Projektowego	Otwarte Zamknięte
1						
2						
3						
4						

Rysunek 3.7.2.1. Zawartość arkusza Design Review Output File (opracowanie własne)

Zakres weryfikacji jest jasno zdefiniowany i obejmuje wszystkie kluczowe elementy dokumentacji projektowej, które mogą wpływać na jakość produktu końcowego i jego zgodność z wymaganiami. Punktem wejścia do Design Review jest przygotowanie dokumentacji CAD oraz danych w systemie GPDM (zestawienia BOM oraz informacje związane z poszczególnymi komponentami), uzupełnionych o specyfikacje klienta, standardy projektowe i wymagania normatywne. Instrukcja dla audytorów określa główne obszary, które muszą zostać przeanalizowane, przy czym – na wniosek zespołu projektowego – proces może być rozszerzony o dodatkowe, specyficzne elementy.

Elementy dokumentacji projektowej, które w każdym przypadku muszą zostać poddane weryfikacji to:

Modele CAD oraz rysunki techniczne w zakresie:

- zgodności z wymaganiami klienta i wewnętrznymi standardami CAD,
- kompletności wymiarów, tolerancji, opisów i oznaczeń,
- stosowania aktualnych szablonów rysunkowych i właściwego formatowania,
- potwierdzenia braku sprzeczności w przedstawieniu wymagań projektowych.

Zestawienia materiałowe (BOM) i dane w systemie GPDM w zakresie

- spójności pomiędzy modelem 3D CAD, rysunkami 2D oraz BOM,
- poprawności numeracji części i hierarchii złożeń,
- kompletności listy komponentów (w tym zakupowych i standardowych),
- eliminacji błędów takich jak zdublowane lub niepotrzebne pozycje.

Charakterystyki specjalne i wymagania krytyczne w zakresie

- prawidłowego oznaczenia charakterystyk specjalnych (SC/CC),
- spójności oznaczeń pomiędzy różnymi poziomami dokumentacji (np. rysunki–BOM–FMEA),
- wskazania wymagań związanych z bezpieczeństwem i regulacjami prawnymi,
- jednoznacznego określenie parametrów, które muszą być utrzymane w produkcji.

Specyfikacje techniczne i wymagania normatywne w zakresie

- poprawnego uwzględnienia wymagań materiałowych, geometrycznych i funkcjonalnych,
- zgodności z obowiązującymi normami branżowymi oraz wewnętrznymi zasadami projektowania,
- odniesienia do regulacji prawnych i dyrektyw (np. bezpieczeństwa, środowiskowych).

Spójność danych projektowych i zmian w zakresie

- sprawdzenia, czy wszystkie zmiany zostały wprowadzone i udokumentowane w pełnym zakresie,
- zgodności wersji dokumentów i numerów rewizji,
- eliminacji niespójności między dokumentacją produktu a dokumentacją procesu.

Aspekty funkcjonalne i montażowe w zakresie

- możliwości prawidłowego montażu części i złożeń,
- uwzględnienia tolerancji montażowych i przestrzeni potrzebnej do zabudowy,
- nieściśłości w złożeniach ujętych w dokumentacji CAD oraz zapewnienie odpowiednich luzów roboczych.

Elementy walidacji i testowania w zakresie

- obecności punktów pomiarowych i kontrolnych w dokumentacji,
- możliwości praktycznej weryfikacji parametrów projektowych (mierzalność cech),
- sprawdzenia czy dokumentacja umożliwia realizację planowanych testów funkcjonalnych i trwałościowych.

Tak określony zakres sprawdzania sprawia, że przegląd dokumentacji projektowej (Design Review) stanowi narzędzie nie tylko identyfikacji niezgodności, ale także prewencji potencjalnych niezgodności mogących ujawnić się na dalszych fazach projektu. Jego rezultaty w postaci skatalogowanych niezgodności i uwag zespołu projektowego stanowią bezpośrednie

wejście do kolejnych działań planowania jakości, takich jak Technical Review czy aktualizacja analiz FMEA.

W procesie Design Review kluczowym elementem jest ocena wpływu zidentyfikowanych niezgodności na możliwość realizacji funkcji produktu końcowego. W pierwszej wersji narzędzia (Design Review 1.0) przyjęto klasyfikację opartą na zasadach stosowanych w audytach procesu wg wymagań VDA 6.3, co pozwoliło na bardziej usystematyzowaną ocenę spełnienia wymagań. Zdecydowano się na skalę punktową, która miała różnicować znaczenie odchyłeń i zapewnić spójność ocen pomiędzy projektami. Skala obejmowała zarówno przypadki całkowitego braku niezgodności, jak i sytuacje krytyczne, uniemożliwiające realizację funkcji głównej produktu.

Tabela 3.7.2.2. Kryteria oceny (poziomu znaczenia) niezgodności w Design Review 1.0 (opracowanie własne)

Ocena	Kryteria klasyfikacji niezgodności ze względu na funkcje produktu końcowego
10	Brak niezgodności
8	Niezgodność o charakterze drugorzędnym, powodująca jedynie nieznaczne ograniczenie komfortu lub działania funkcji pomocniczych produktu końcowego; funkcja główna pozostaje w pełni zachowana.
6	Niezgodność istotnie wpływająca na funkcję drugorzędną, ograniczająca jej poprawne działanie lub prowadząca do częściowej utraty funkcjonalności; funkcja główna produktu końcowego pozostaje zachowana.
4	Niezgodność poważna, która bezpośrednio zagraża prawidłowej realizacji funkcji głównej produktu końcowego.
0	Niezgodność uniemożliwiająca realizację funkcji głównej produktu końcowego.

Doświadczenia z tego etapu związanego z wdrażaniem DR pokazały jednak, że rozróżnienie pomiędzy niektórymi poziomami znaczenia – w szczególności pomiędzy oceną 6 i 8 punktów (Tabela 3.7.2.2) – było niejednoznaczne i w praktyce sprawiało trudności zespołom dokonującym oceny. W wielu przypadkach niezgodności zakwalifikowane pierwotnie jako „8” były interpretowane przez inne zespoły jako „6”, co obniżało spójność wyników i prowadziło do rozbieżności pomiędzy projektami. W konsekwencji, w drugiej wersji narzędzia (Design Review 2.0) podjęto decyzję o uproszczeniu skali punktowej poprzez konsolidację poziomów oceny. Ostatecznie zrezygnowano z odrębnej wartości „8”, a wszystkie niezgodności przypisane wcześniej do tej kategorii zostały włączone do poziomu znaczenia „6”. W wyniku tego skala oceny niezgodności została zredukowana do trzech poziomów znaczenia (0, 4, 6), co istotnie zwiększyło jej przejrzystość, poprawiło powtarzalność ocen i ułatwiło stosowanie podczas przeglądów dokumentacji.

Warto zaznaczyć, że w tabeli klasyfikacji (tabela 3.7.2.3) uwzględniono również poziom znaczenia „10”, oznaczającą brak niezgodności. Ten poziom ma charakter czysto referencyjny – pozwala odnotować sytuacje, w których dokumentacja nie zawiera żadnych uchybień – lecz nie jest on uwzględniany w raportowanych wynikach ani analizach statystycznych, ponieważ nie wnosi informacji o źródłach potencjalnych problemów.

Tabela 3.7.2.3. Kryteria oceny (poziomu znaczenia) niezgodności w Design Review 2.0 (opracowanie własne)

Ocena	Kryteria klasyfikacji niezgodności ze względu na funkcje produktu końcowego
10	Brak niezgodności
6	Wymagania klienta, normy branżowe lub standardy projektowe nie są spełnione; niezgodność może powodować obniżenie komfortu użytkowania (tzw. „annoyance”) lub inne problemy wizualne/akustyczne, nie wpływające na funkcję główną produktu końcowego.
4	Wymagania klienta, normy branżowe lub standardy projektowe nie są spełnione; niezgodność wpływa na funkcje drugorzędne produktu końcowego, ograniczając ich poprawne działanie lub funkcjonalność.
0	Wymagania klienta, normy branżowe lub kluczowe standardy projektowe nie są spełnione; niezgodność wiąże się z wysokim ryzykiem dla bezpieczeństwa, niezgodnością regulacyjną lub bezpośrednim zagrożeniem dla funkcji głównej produktu końcowego.

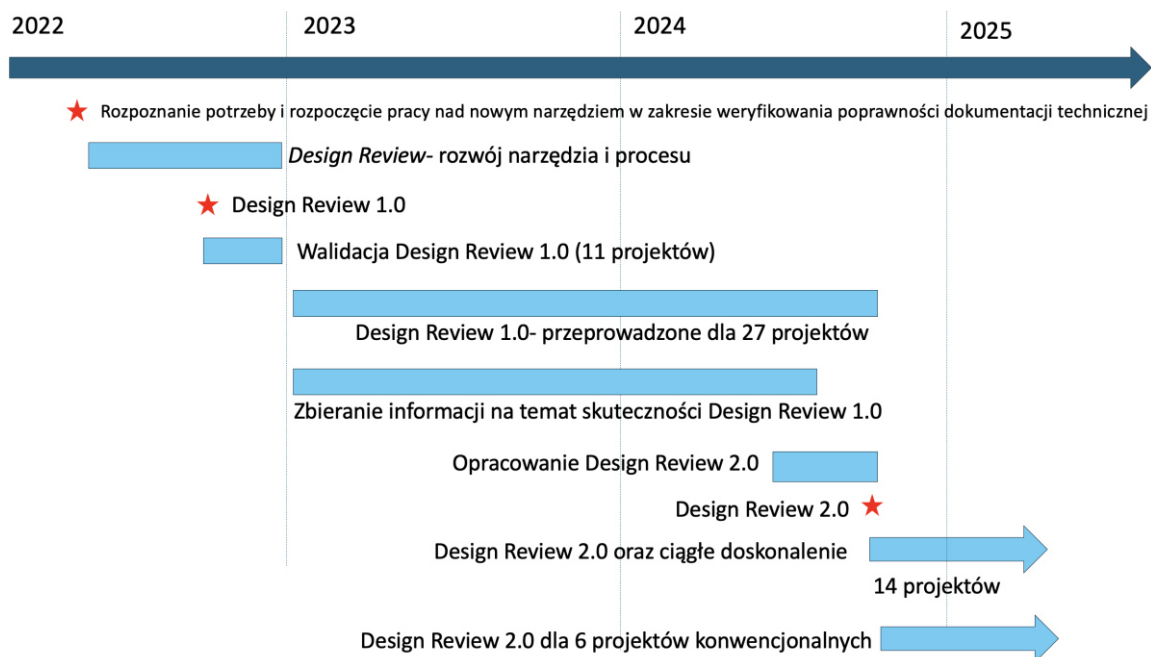
Nowe podejście pozwoliło lepiej zintegrować proces Design Review z metodologią FMEA, w której klasyfikacja „Severity” opiera się na wpływie potencjalnych niezgodności na funkcje produktu. Dzięki temu wyniki Design Review mogą być bezpośrednio wykorzystywane jako dane wejściowe do analiz ryzyka, co zapewnia spójność instrumentarium planowania jakości i zwiększa jego praktyczną użyteczność.

3.7.3 Ewolucja rozwoju instrumentu Design Review

Rozwój narzędzia Design Review (Rysunek 3.7.3.1) miał charakter iteracyjny i wynikał bezpośrednio z doświadczeń ujawnionych podczas pierwszych wdrożeń oraz z potrzeb zgłaszanych przez zespoły projektowe. Początkowe rozwiązania, choć pozwalały na usystematyzowanie procesu przeglądów, ujawniły istotne ograniczenia w zakresie standaryzacji zapisów, możliwości ich dalszej analizy oraz integracji z innymi procesami planowania jakości. z tego względu konieczne stało się stopniowe doskonalenie narzędzia, tak aby nie tylko wspierało bieżące projekty, lecz również tworzyło spójne podstawy do budowania wiedzy organizacyjnej i ułatwiało transfer doświadczeń pomiędzy zespołami projektowymi.

W pierwszej wersji narzędzia Design Review proces archiwizacji wyników opierał się na dedykowanym notatniku w aplikacji OneNote, utworzonym specjalnie na potrzeby tego procesu. Dla każdego projektu tworzone osobną sekcję, w której gromadzono komplet

materiałów z przeprowadzonego przeglądu. Dokumentacja była drukowana i poddawana weryfikacji, a następnie – po naniesieniu uwag – skanowana i dołączana do odpowiedniego miejsca w OneNote. Takie podejście zapewniało prostą strukturę przechowywania danych i umożliwiało szybki dostęp do materiałów z konkretnych projektów, jednak ograniczało możliwości standaryzacji zapisów oraz późniejszej analizy porównawczej między projektami.



Rysunek 3.7.3.1 Oś czasu rozwoju narzędzia „Design Review” (opracowanie własne)

Przedstawiona oś czasu (Rysunek 3.7.3.1) ilustruje kolejne etapy rozwoju narzędzia *Design Review* – od zidentyfikowania potrzeby usprawnienia weryfikacji poprawności dokumentacji technicznej, poprzez opracowanie i wdrożenie wersji 1.0, jej walidację i ocenę wyników, aż po rozwój wersji 2.0 oraz rozpoczęcie procesu jej ciągłego doskonalenia. Wykres ten obejmuje kamienie milowe, takie jak: uruchomienie pierwszej wersji narzędzia, rozszerzenie jego funkcjonalności, przeniesienie repozytorium wyników na platformę *SharePoint* oraz wprowadzenie ujednoliconego arkusza wyników przeglądu dokumentacji projektowej. Umieszczenie poszczególnych zdarzeń na osi czasu pozwala zobrazować dynamikę prac rozwojowych oraz powiązanie wdrożonych usprawnień z cyklem realizowanych projektów.

Kolejnym etapem było opracowanie *Design Review 2.0*, w którym wprowadzono istotne usprawnienia zarówno w obszarze organizacyjnym, jak i technicznym. Do usprawnień organizacyjnych zaliczyć można przede wszystkim ujednolicenie procedury przeglądów, standaryzację dokumentów oraz zdefiniowanie jednoznacznych ról i odpowiedzialności członków zespołu projektowego. Usprawnienia polegały na przeniesieniu dokumentacji wyników przeglądów na specjalny portal *SharePoint*. Takie rozwiązanie umożliwiło łatwy dostęp do wszystkich danych w jednym miejscu, pozwoliło kontrolować, kto ma prawo do przeglądania lub edytowania dokumentów w zależności od przypisanej roli w projekcie,

zapewniło możliwość sprawdzania historii zmian oraz szybkie wyszukiwanie potrzebnych informacji poprzez uporządkowane opisy plików.

W ramach tej wersji opracowano także ujednolicony arkusz (Rysunek 3.7.2.1) wyników przeglądu dokumentacji projektowej (Design Review Output File), w którym rejestrowane są rezultaty przeglądów wraz z klasyfikacją niezgodności oraz uwagami zespołu projektowego. Arkusz przewiduje możliwość bezpośredniego ustosunkowania się zespołu do każdej zidentyfikowanej niezgodności – w uzasadnionych przypadkach dopuszczalne jest jej wykreślenie z listy lub obniżenie przypisanej istotności – co pozwala na dynamiczne zarządzanie wynikami przeglądu i dostosowywanie priorytetów działań korygujących.

Dodatkowo poszerzono listę kontrolną elementów podlegających weryfikacji. Obejmuje ona nie tylko zagadnienia konstrukcyjne (rysunki techniczne, modele 3D CAD, zestawienia materiałowe), lecz również wymagania norm branżowych, specyfikacje klienta oraz wewnętrzne standardy projektowe stosowane w organizacji (wcześniej wskazane przez zespół projektowy). Dzięki temu zakres przeglądu został rozszerzony o aspekty zapewniające pełną zgodność dokumentacji zarówno z wymaganiami zewnętrznymi, jak i wewnętrznymi regulacjami.

3.7.4 Prezentacja wyników wdrożenia

Wdrożenie narzędzia *Design Review* zostało przeprowadzone w sposób etapowy, z wykorzystaniem podejścia iteracyjnego, co umożliwiło systematyczną ocenę skuteczności oraz stopniowe doskonalenie kryteriów oceny dokumentacji technicznej. Wersja 1.0 została zwalidowana na próbie 11 projektów amortyzatorów sterowanych elektronicznie, a następnie rozszerzona na kolejne 27 projektów, co pozwoliło na zebranie reprezentatywnych danych dotyczących rodzaju i częstości występowania niezgodności. Wyniki tej fazy posłużyły do opracowania udoskonalonej wersji 2.0, wdrożonej pod koniec 2024 roku, obejmującej 14 projektów amortyzatorów mechatronicznych. Równolegle przygotowano adaptację narzędzia dla produktów o mniejszej złożoności, przeprowadzając przeglądy w 6 projektach amortyzatorów konwencjonalnych, co umożliwiło ocenę zakresu jego uniwersalności.

Analiza wyników została oparta na danych z poszczególnych faz planowania jakości, co pozwoliło jednoznacznie wskazać etapy cyklu życia projektu najbardziej podatne na występowanie niezgodności. W opracowaniu wykorzystano zarówno metody ilościowe (liczba i typ niezgodności w poszczególnych fazach), jak i metody strukturalne (diagramy Pareto – ogólne oraz z podziałem na fazy).

Proces klasyfikacji niezgodności również miał charakter wielopoziomowy. Początkowo wszystkie przypadki były rejestrowane w ramach procesu eskalacji R/Y/G (Red/Yellow/Green), stosowanego do oceny jakości dokumentacji na poziomie projektu. W kolejnym kroku wprowadzono podział na kategorie i podkategorie, odzwierciedlające typowe źródła błędów, takie jak brak danych na rysunku, niespójności w BOM, naruszenia standardów CAD czy błędne założenia konstrukcyjne. Pełne zestawienie niezgodności przedstawia tabela 3.7.4.1.

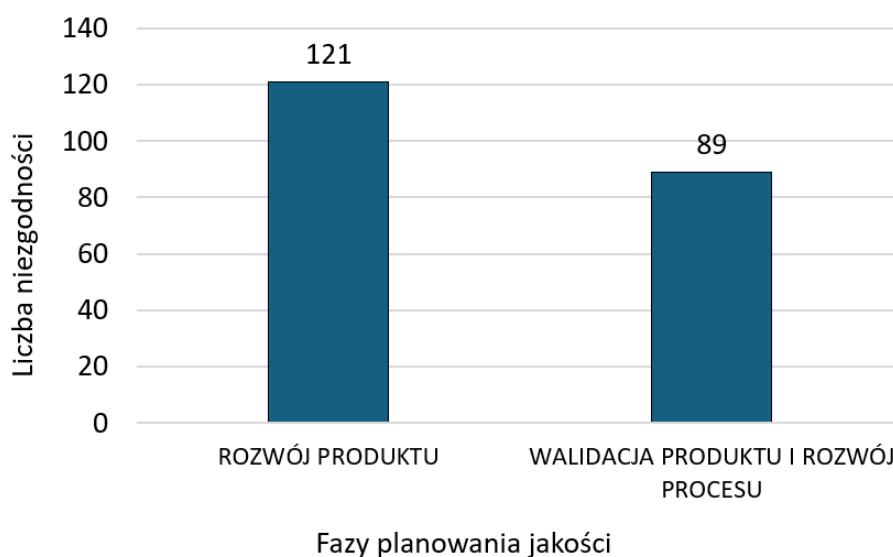
Tabela 3.7.4.1. Kategorie i podkategorie niezgodności w dokumentacji technicznej wraz z przypisanymi symbolami N1–N10 (opracowanie własne)

NIEZGODNOŚCI- R/Y/G		NIEZGODNOŚCI- DESIGN REVIEW	
KATEGORIA NIEZGODNOŚĆ	PODKATEGORIA NIEZGODNOŚCI	KATEGORIA NIEZGODNOŚĆ (W OBSZARZE DOKUMENTACJI TECHNICZNEJ)	PODKATEGORIA NIEZGODNOŚĆ (W OBSZARZE DOKUMENTACJI TECHNICZNEJ)
Niezgodności w dokumentacji technicznej	Niepełne, niejednoznaczne lub błędnie odwzorowane wymagania klienta w dokumentacji technicznej.	Niezgodność specyfikacji z rysunkiem klienta (oznaczenie niezgodności: N4)	Różnice wartości wymiarów, tolerancji lub specyfikacji między dokumentacją wewnętrzną a rysunkiem zatwierdzonym przez klienta.
	Rozbieżności, braki lub niespójności w dokumentacji technicznej CAD / GPDM	Błędne założenia i ograniczenia konstrukcyjne (oznaczenie niezgodności: N5)	Niewłaściwe rozwiązania projektowe lub parametry wymiarowo-geometryczne (tolerancje, bazy), skutkujące niespełnieniem wymagań technicznych, funkcjonalnych, klienta lub warunków montażowych.
		Brak danych technicznych na rysunku (oznaczenie niezgodności: N6)	Niewystarczające lub brakujące informacje na rysunku technicznym, takie jak masa, materiał, numer referencyjny lub symbol cechy specjalnej, niezbędne do jego jednoznacznej identyfikacji i prawidłowego wykonania.
		Niezgodność parametrów konstrukcyjnych (oznaczenie niezgodności: N8)	Nieprawidłowe zdefiniowanie parametrów konstrukcyjnych skutkujące błędnymi wymiarami lub niespójnościami między parametrami (np. nieprawidłowe położenie końcowe, niewłaściwa wartość przemieszczenia).
		Niezgodność ze standardami CAD (oznaczenie niezgodności: N2)	Rysunek techniczny niezgodny ze standardami CAD obowiązującymi w organizacji (np. układ rysunku, opisy, wymagane uwagi, oznaczenia, sposób wymiarowania, styl linii, struktura warstw, style tekstów, jednostki, format plików).
		Niezgodność w BOM lub danych materiałowych (oznaczenie niezgodności: N1)	Niekompletne, nieaktualne lub błędne informacje w zestawieniu materiałowym (BOM- Bill of Material) lub danych materiałowych (MM), takie jak brak numeru części, brak określenia materiału, nieprawidłowe ilości lub niezgodności między poziomami BOM.
		Niegodne oznaczenie charakterystyki specjalnej (oznaczenie niezgodności: N3)	Brak oznaczenia lub nieprawidłowe przypisanie charakterystyki specjalnej do konkretnego parametru w dokumentacji technicznej.
		Niekontrolowane kopiowanie dokumentacji (oznaczenie niezgodności: N7)	Częściowe kopiowanie dokumentacji z poprzedniego projektu bez pełnej weryfikacji, skutkujące nieaktualnymi lub nieprawidłowymi danymi w nowym projekcie.
		Niezgodność BOM z modelem CAD (oznaczenie niezgodności: N9)	Nieprawidłowe odwzorowanie struktury montażowej lub funkcjonalnej w BOM względem modelu 3D w systemie CAD.
	Indywidualne przypadki niezgodności w obszarze dokumentacji technicznej	Indywidualne przypadki niezgodności (oznaczenie niezgodności: N10)	Inna niezgodność techniczna nieuwzględniona w powyższych kategoriach – wymaga indywidualnej analizy.

Dla celów analitycznych każdej niezgodności nadano unikalny symbol (N1–N10), co pozwoliło na znaczną kompaktowość opracowania. Symbole mogły być bezpośrednio stosowane w zestawieniach tabelarycznych oraz na wykresach, co ograniczyło ich objętość graficzną i zwiększyło przejrzystość prezentacji danych.

Opracowana klasyfikacja stała się punktem odniesienia dla dalszych analiz. Umożliwiła budowę wykresów Pareto dla całego zbioru oraz poszczególnych faz planowania jakości projektu, a także stanowiło podstawę do porównań pomiędzy amortyzatorami konwencjonalnymi i sterowanymi elektronicznie. Walidacja procesu stanowiła w tym kontekście kluczowy etap – jej celem było potwierdzenie praktycznej użyteczności narzędzia oraz sprawdzenie, czy przyjęte kryteria pozwalają na skuteczną identyfikację i klasyfikację niezgodności. Dzięki temu możliwe było zarówno zweryfikowanie poprawności założeń metody, jak i określenie jej wpływu na jakość dokumentacji technicznej.

Na tej bazie przeprowadzono szczegółową analizę wyników walidacji *Design Review 1.0*, obejmującą 210 zidentyfikowanych niezgodności (Rysunek 3.7.4.1). Zdecydowana większość przypadków została przypisana do fazy rozwoju produktu – 121 niezgodności, co potwierdza, że dokumentacja projektowa w tym okresie jest szczególnie podatna na ujawnianie rozbieżności. W dalszej kolejności odnotowano 89 niezgodności w fazie walidacji produktu i rozwoju procesu.



Rysunek 3.7.4.1 Liczba niezgodności w poszczególnych fazach planowania jakości – walidacja DR 1.0 (opracowanie własne)

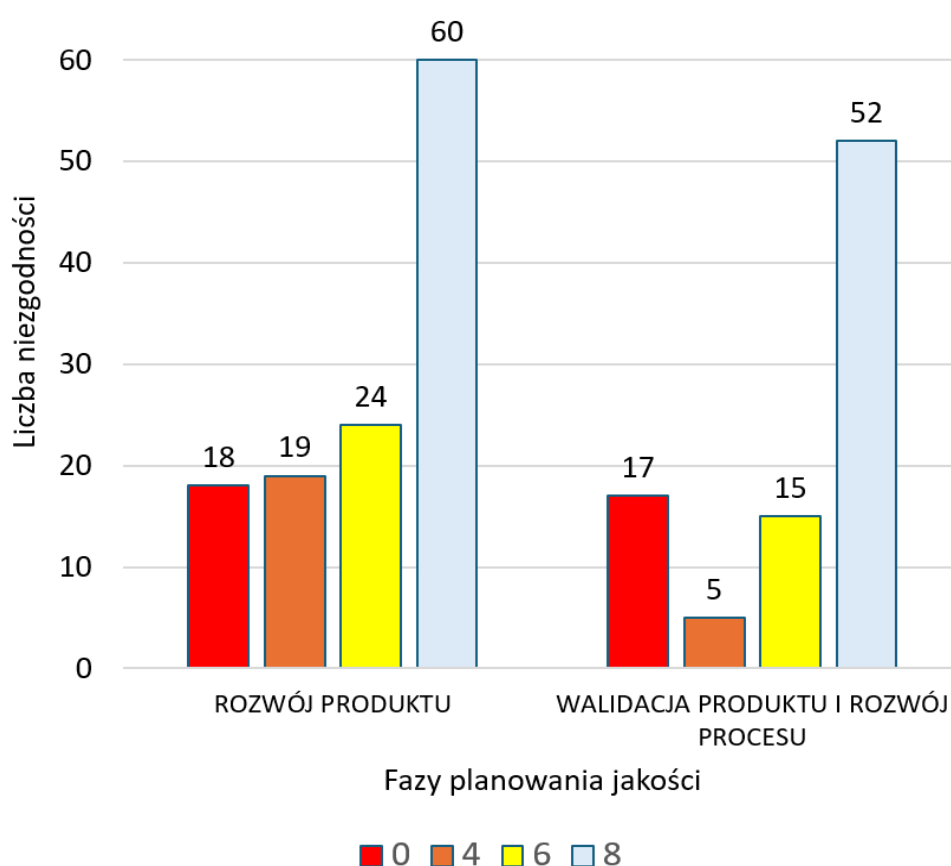
Wykres na rysunek 3.7.4.2 przedstawia liczbę niezgodności w poszczególnych fazach planowania jakości z uwzględnieniem ich poziomu znaczenia wg tabeli 3.7.2.2.

W fazie rozwoju produktu odnotowano 121 niezgodności, z czego największy udział miały przypadki zaklasyfikowane na poziomie znaczenia 8 - 60 niezgodności, oznaczające istotny wpływ na funkcje drugorzędne. Kolejną grupę stanowiły niezgodności na poziomie znaczenia

6 - 24 niezgodności, dalej poważniejsze – poziom znaczenia 4 - 19 niezgodności oraz krytyczne – poziom znaczenia 0 = 18 niezgodności.

W fazie walidacji produktu i rozwoju procesu łączna liczba niezgodności była niższa i wyniosła 89. Podobnie jak w fazie rozwoju, dominowały niezgodności ocenione na poziomie znaczenia 8 - 52 niezgodności, następnie na poziomie znaczenia 6 - 15 niezgodności. Zidentyfikowano również 17 przypadków krytycznych - 0 niezgodności oraz 5 niezgodności poważnych o poziomie znaczenia 4.

Porównanie wyników obu faz wskazuje na podobny układ dominujących niezgodności. Najwięcej przypadków odnotowano w grupie o średnim wpływie – na poziomie znaczenia 8 zidentyfikowano 60 niezgodności w fazie rozwoju produktu oraz 52 w fazie walidacji, natomiast na poziomie znaczenia 6 odpowiednio 24 i 15. Niezgodności poważne, oznaczone poziomem znaczenia 4, wystąpiły rzadziej – 19 razy w fazie rozwoju i 5 razy w fazie walidacji. Najwyższe znaczenie miały natomiast niezgodności krytyczne (poziom 0), których liczba była zbliżona w obu fazach, osiągając 18 przypadków w rozwoju oraz 17 podczas walidacji. Taki rozkład potwierdza powtarzalny charakter problemów jakościowych, niezależnie od etapu realizacji projektu.

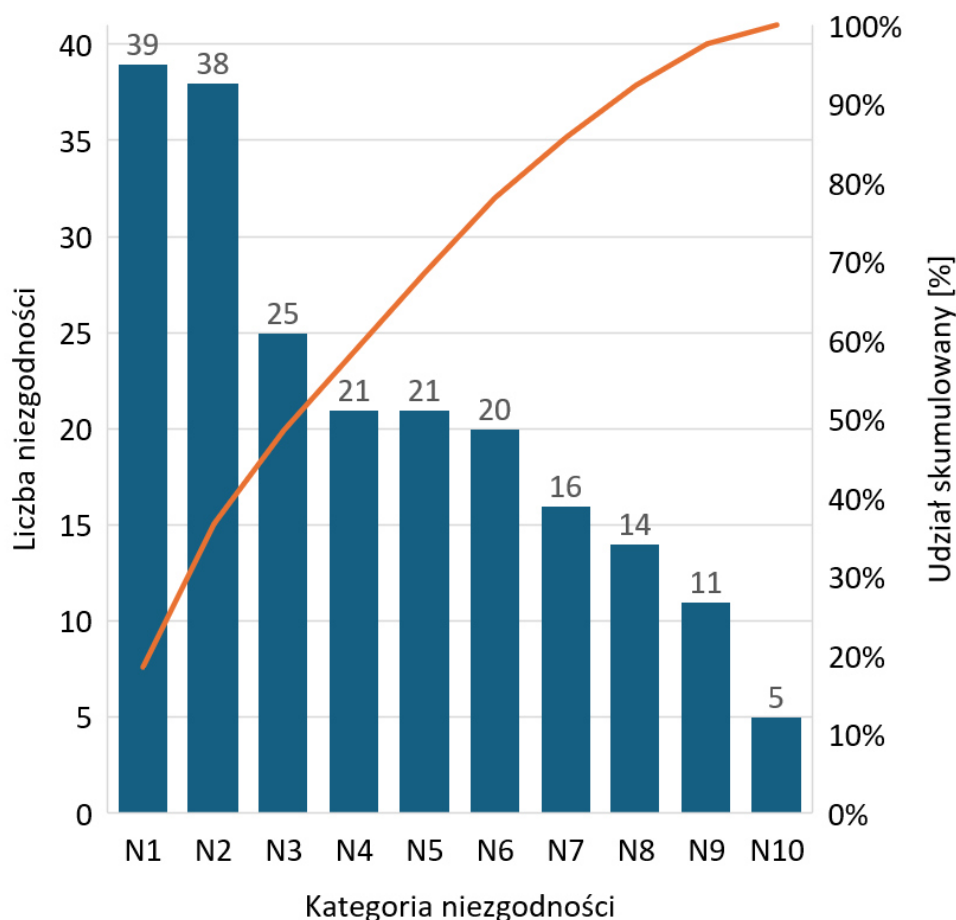


Rysunek 3.7.4.2. Liczba i poziom znaczenia niezgodności vs. fazy planowania jakości – walidacja DR 1.0, kryteria oceny niezgodności wg tabeli 3.7.2.2 (opracowanie własne)

Dalsza analiza została przeprowadzona z wykorzystaniem wykresu Pareto, który umożliwia określenie, które kategorie niezgodności miały największy udział w całości (Rysunek 3.7.4.3). Zestawienie obejmuje dziesięć kategorii niezgodności od N1 do N10), a dane przedstawiono w dwóch ujęciach: liczby niezgodności oraz ich udziału skumulowanego w procentach (dla całości danych bez podziału na fazy planowania jakości).

Największa liczba niezgodności została odnotowana dla niezgodności – N1 - 39 co stanowi 18,6 % i N2 -38 co stanowi 18,1%, co razem obejmują blisko 36,7% wszystkich zliczonych niezgodności. Kolejne miejsca zajmują kategorie niezgodności N3 - 25 co stanowi 11,9% oraz N4 i N5 – po 21, co odpowiada 10,0% dla każdej. Kategoria niezgodności N6 z odnotowanymi 20 niezgodnościami stanowi 9,5%. Niższe wartości występują w kategoriach niezgodności N7 -16 co stanowi 7,6%, N8- 14 co stanowi 6,7%, N9 - 11 co stanowi 5,2% oraz N10 - 5 co stanowi 2,4%.

Krzywa udziału skumulowanego wskazuje, iż sześć pierwszych kategorii niezgodności od N1 do N6) odpowiada za ponad 76% wszystkich odnotowanych niezgodności. Dominującą grupę stanowią kategorie niezgodności N1 i N2, które łącznie obejmują 77 przypadków, co odpowiada około 36,7% ich sumy. Dopełniają je kategorie N3–N5, które razem obejmują 67 przypadków, co stanowi 31,9% ich sumy. W rezultacie pięć pierwszych kategorii niezgodności koncentruje blisko 69% wszystkich kategorii niezgodności, wyraźnie dominując nad pozostałymi, podczas gdy kategorie N7–N10 obejmują łącznie około 22% wszystkich kategorii niezgodności.

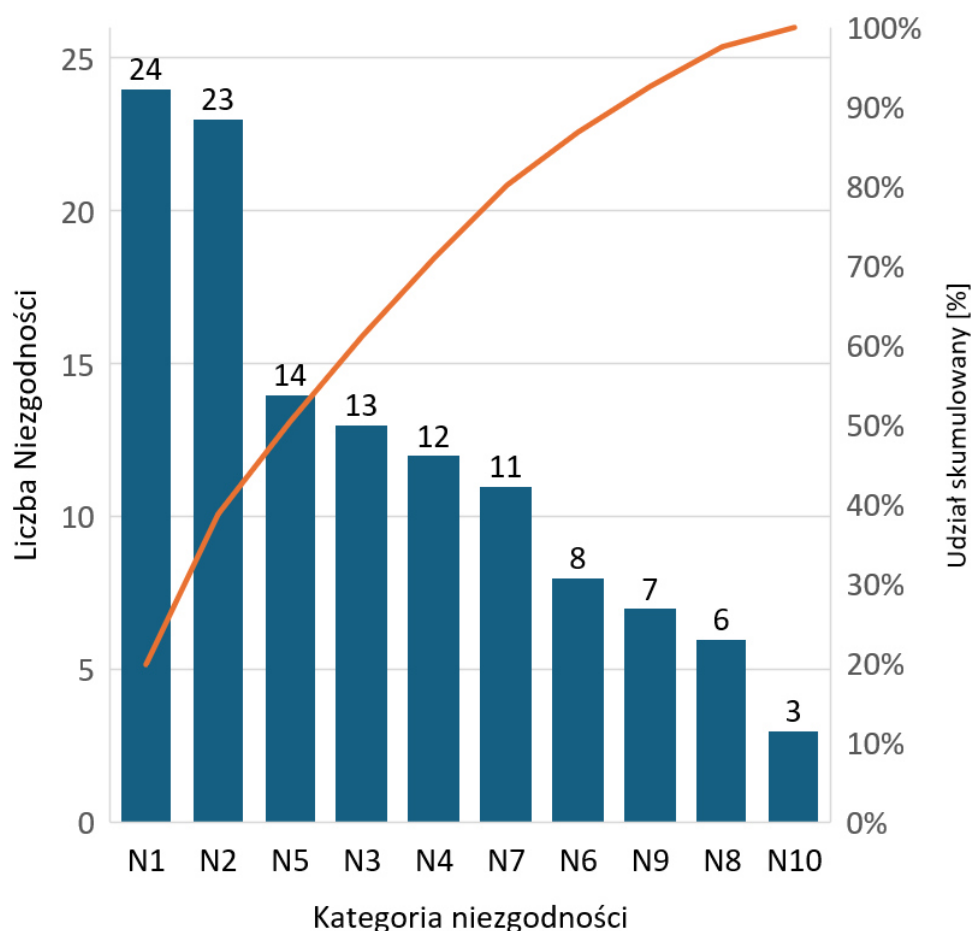


Rysunek 3.7.4.3. Analiza Pareto kategorii niezgodności zidentyfikowanych podczas walidacji Design Review 1.0, oznaczenia N1–N10 zgodnie z tabelą 3.7.4.1 (opracowanie własne)

Wykres Pareto (Rysunek 3.7.4.4) przedstawia rozkład niezgodności w dziesięciu kategoriach od N1–do N10 w fazie projektowania i rozwoju produktu (walidacja DR 1.0). Dane zaprezentowano w ujęciu liczby niezgodności oraz udziału skumulowanego w procentach.

Największą liczbę niezgodności odnotowano w kategoriach niezgodności N1 -24 co stanowi 19,8% oraz N2 -23 co stanowi 19,0%. To właśnie te dwie grupy kategorii niezgodności dominują w analizie, obejmując łącznie 38,8% wszystkich niezgodności. Kolejne miejsca zajmują kategorie niezgodności: N5 - 14 co stanowi 11, 6% udziału, N3 - 13 co stanowi 10,7% udziału i N4 - 12 co stanowi 9,9% udziału. W dalszej kolejności plasują się kategorie niezgodności N7 - 11 co stanowi 9,1% udziału oraz N6 - 8 co stanowi 6,6%. Najmniejszy udział mają kategorie N9 - 7 co stanowi 5,8% udziału, N8 - 6 co, stanowi 5,0% udziału i N10 - 3 co stanowi 2,5% udziału.

Krzywa udziału skumulowanego wskazuje, że pięć pierwszych kategorii: N1, N2, N5, N3, N4 obejmuje 72% wszystkich niezgodności, a sześć pierwszych kategorii niezgodności do N7 łącznie – ponad 81% udziału. W strukturze dominującą rolę pełnią kategorie N1 - 24 niezgodności co stanowi 19,8% oraz N2 - 23 niezgodności co stanowi 19,0%, które łącznie dają 47 niezgodności, co odpowiada 38,8% sumy wszystkich niezgodności. W połączeniu z kolejnymi trzema kategoriami: N5, N3, N4 wyznaczają one główny obszar koncentracji.

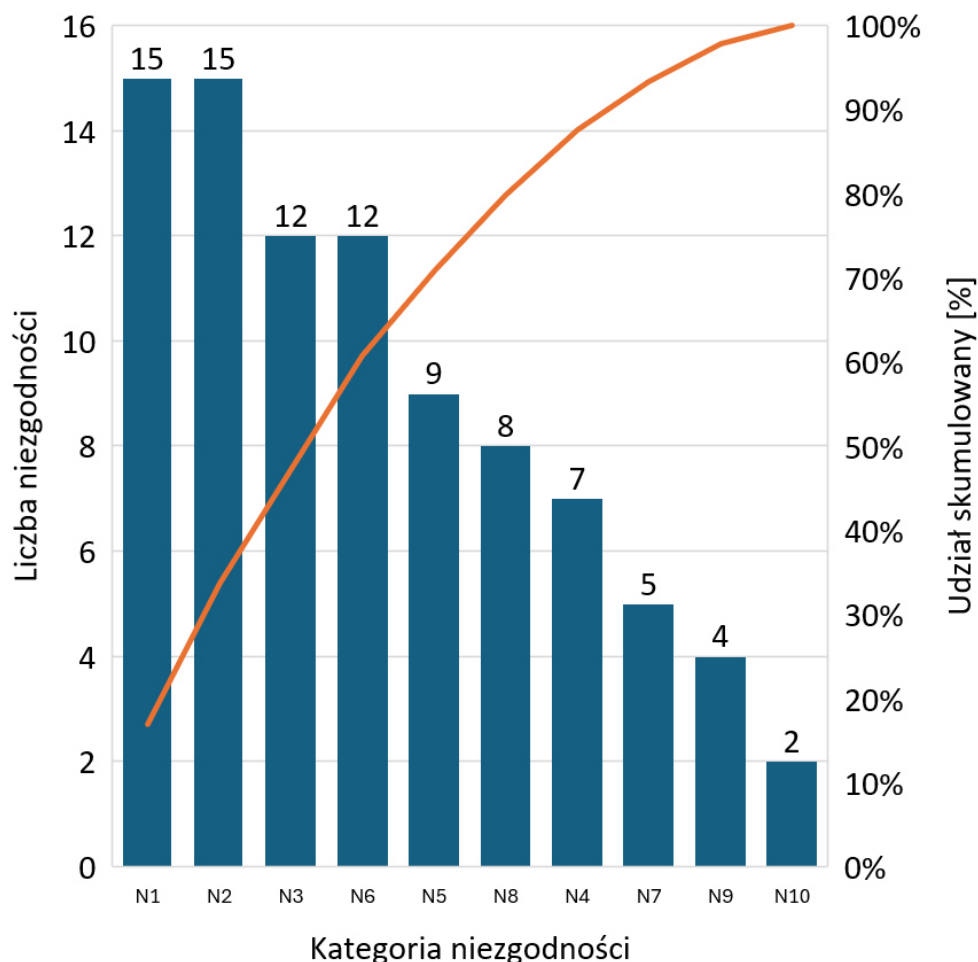


Rysunek 3.7.4.4. Analiza Pareto kategorii niezgodności występujących w fazie projektowania i rozwoju produktu podczas walidacji DR 1.0, oznaczenia N1–N10 zgodnie z tabelą 3.7.4.1 (opracowanie własne)

Wykres Pareto (rys 3.7.4.5) przedstawia rozkład niezgodności w dziesięciu kategoriach od N1 do N10) w fazie walidowania produktu i rozwoju procesu. Dane zaprezentowano w ujęciu liczby niezgodności oraz udziału skumulowanego w procentach.

Największą liczbę niezgodności odnotowano w kategoriach niezgodności N1 – 15, co stanowi 16,9% oraz N2 – 15, co stanowi 16,9%. Łącznie obejmują one 30 niezgodności, co stanowi 33,8% wszystkich. Kolejne miejsca zajmują kategorie niezgodności N3 – 12, co stanowi 13,5% i N6 – 12, co stanowi 13,5%, a następnie kategorie niezgodności N5 – 9, co stanowi 10,1% oraz N8 – 8, co stanowi 9,0%. Mniejszy udział mają kategorie niezgodności N4 – 7, co stanowi 7,9%, N7 – 5, co stanowi 5,6%, N9 – 4, co stanowi 4,5% oraz N10 – 2, co stanowi 2,2%.

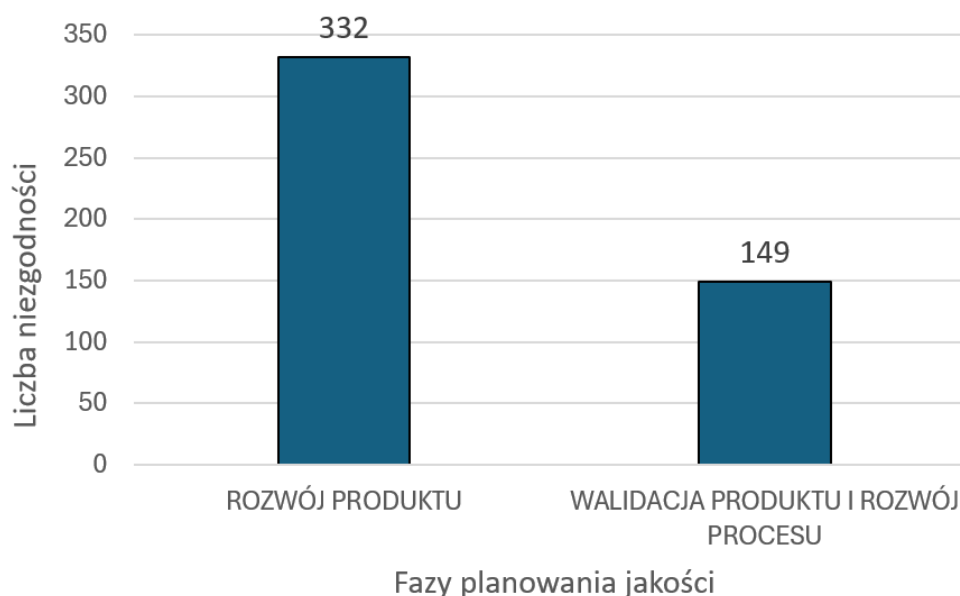
Krzywa udziału skumulowanego wskazuje, że pięć pierwszych kategorii niezgodności (N1, N2, N3, N6, N5) obejmuje łącznie około 70% wszystkich niezgodności, a siedem pierwszych – już ponad 87%. W analizie dominują więc kategorie niezgodności N1 i N2, które w połączeniu z N3, N6 i N5 tworzą główny obszar koncentracji niezgodności.



Rysunek 3.7.4.5. Analiza Pareto kategorii niezgodności występujących w fazie walidowania produktu i rozwoju procesu podczas walidacji DR 1.0, oznaczenia N1–N10 zgodnie z tabelą 3.7.4.1 (opracowanie własne)

Wyniki pełnego wdrożenia Design Review 1.0

Po zakończeniu fazy pilotażowej wdrażania narzędzie *Design Review 1.0* zostało one wdrożone do szerokiego stosowania, zostało nim objęte łącznie 27 zrealizowanych projektów związanych z planowaniem jakości nowego produktu i procesu. W okresie prowadzenia badań zidentyfikowano 481 niezgodności (Rysunek 3.7.4.6.), które rozłożyły się pomiędzy kluczowe fazy planowania jakości. Największą część stanowiły niezgodności przypisane do fazy rozwoju produktu – 332 niezgodności. Znaczącą liczbę niezgodności odnotowano również dla fazy walidacji produktu i rozwoju procesu – 149 niezgodności, co potwierdza, że także ten etap stanowi istotne źródło identyfikacji niezgodności wymagających dalszego doskonalenia.

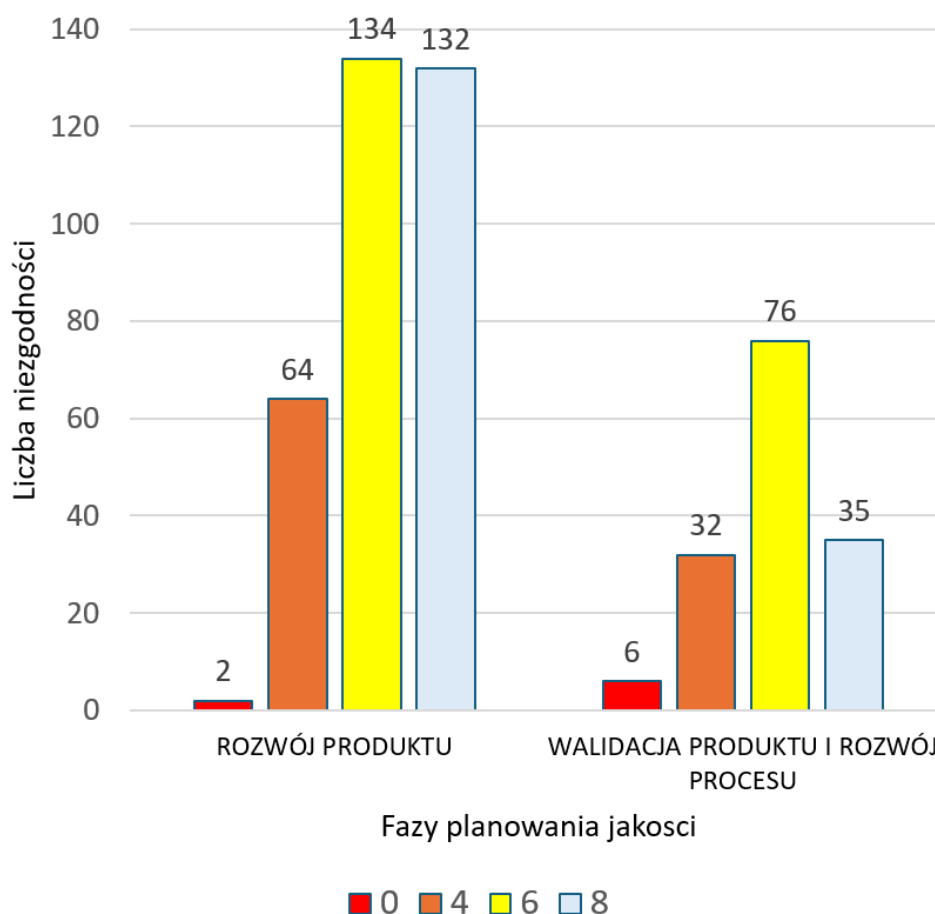


Rysunek 3.7.4.6. Liczba niezgodności w poszczególnych fazach planowania jakości –pełne wdrożenie DR 1.0 (opracowanie własne)

Rozkład poziomów znaczenia niezgodności (Rysunek 3.7.4.7) wskazuje, że w fazie rozwoju produktu największa liczba niezgodności została zaklasyfikowana na poziomie znaczenia 6 - 134 przypadki) oraz 8 - 132 przypadki, co oznacza istotny wpływ na funkcje drugorzędne wyrobu. Kolejno odnotowano 64 przypadki na poziomie znaczenia 4, odnoszące się do ograniczeń działania funkcji głównej. Dodatkowo zidentyfikowano 2 niezgodności o wartości 0, czyli krytyczne, bezpośrednio zagrażające funkcji głównej produktu.

W fazie walidacji produktu i rozwoju procesu rozkład był podobny – dominowały niezgodności na poziomie znaczenia 6 - 76 przypadków, następnie na poziomie znaczenia 8 - 35 przypadków oraz 4 - 32 przypadki. W tej fazie wystąpiło również 6 przypadków ocenionych jako krytyczne o poziomie oceny 0).

Zarówno w fazie rozwoju, jak i walidacji produktu i rozwoju procesu, zdecydowaną większość stanowiły niezgodności o średnim wpływie – poziomy znaczenia 6 i 8, co potwierdza obserwowaną tendencję, że problemy częściej dotyczyły funkcji drugorzędnych niż kluczowych funkcji produktu.

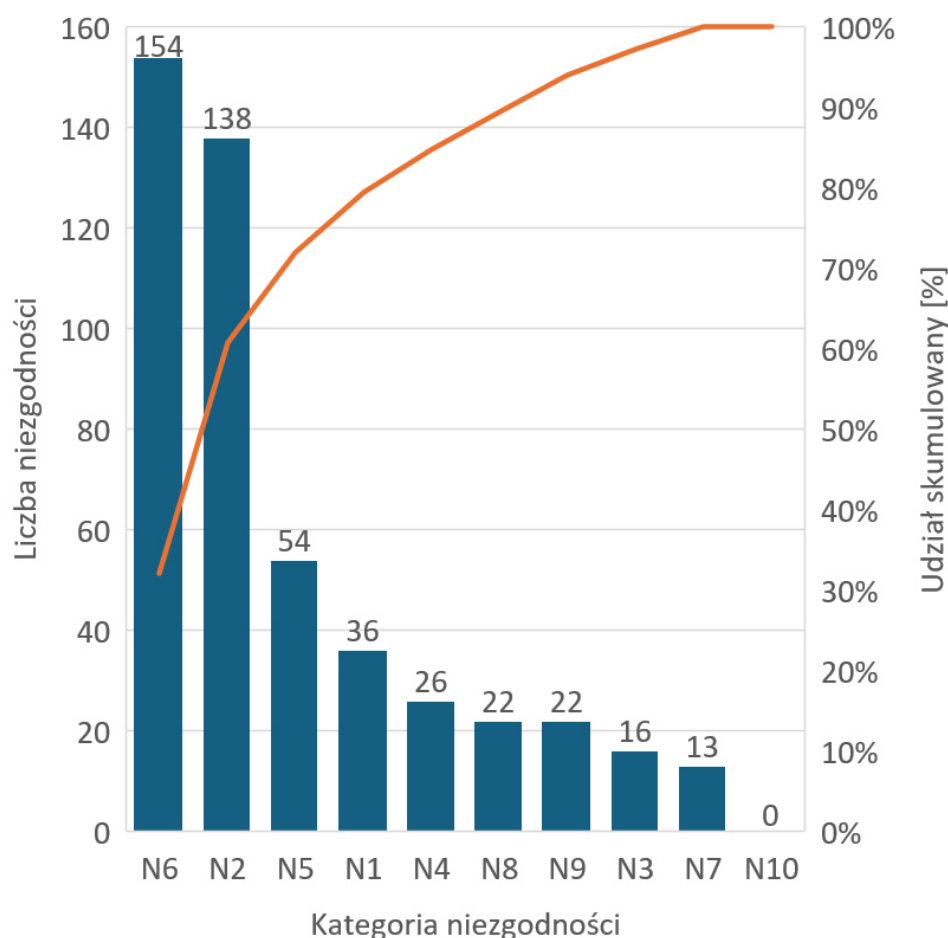


Rysunek 3.7.4.7. Liczba i poziom znaczenia niezgodności vs. fazy planowania jakości – pełne wdrożenie DR 1.0 (opracowanie własne)

Wykres Pareto (rys 3.7.4.8) przedstawia rozkład niezgodności po etapie walidacji *Design Review 1.0*. Dane obejmują dziesięć kategorii niezgodności od N1 do N10, zaprezentowanych w układzie liczby przypadków oraz udziału skumulowanego w procentach.

Największą liczbę niezgodności odnotowano w kategoriach niezgodności N6 – 154, co stanowi 32,0% oraz N2 – 138, co stanowi 28,7%. Łącznie te dwie kategorie obejmują 292 niezgodności, co stanowi aż 60,7% wszystkich. Kolejne miejsca zajmują kategorie niezgodności N5 – 54, co stanowi 11,2% oraz N1 – 36, co stanowi 7,5%, a następnie kategoria niezgodności N4 – 26, co stanowi 5,4%. Udział pozostałych kategorii niezgodności jest znacznie niższy i rozkłada się równomiernie: N8 – 22, co stanowi 4,6%, N9 – 22, co stanowi 4,6%, N3 – 16, co stanowi 3,3% oraz N7 – 13, co stanowi 2,7%.

Kategoria niezgodności N10 nie została odnotowana. Krzywa udziału skumulowanego wskazuje, że trzy pierwsze kategorie niezgodności (N6, N2, N5) obejmują łącznie ponad 71% wszystkich, a pięć pierwszych kategorii niezgodności (N6, N2, N5, N1, N4) – już ponad 84%. W analizie dominującą rolę pełnią więc kategorie niezgodności N6 i N2, których łączny udział przekracza 60% całości.

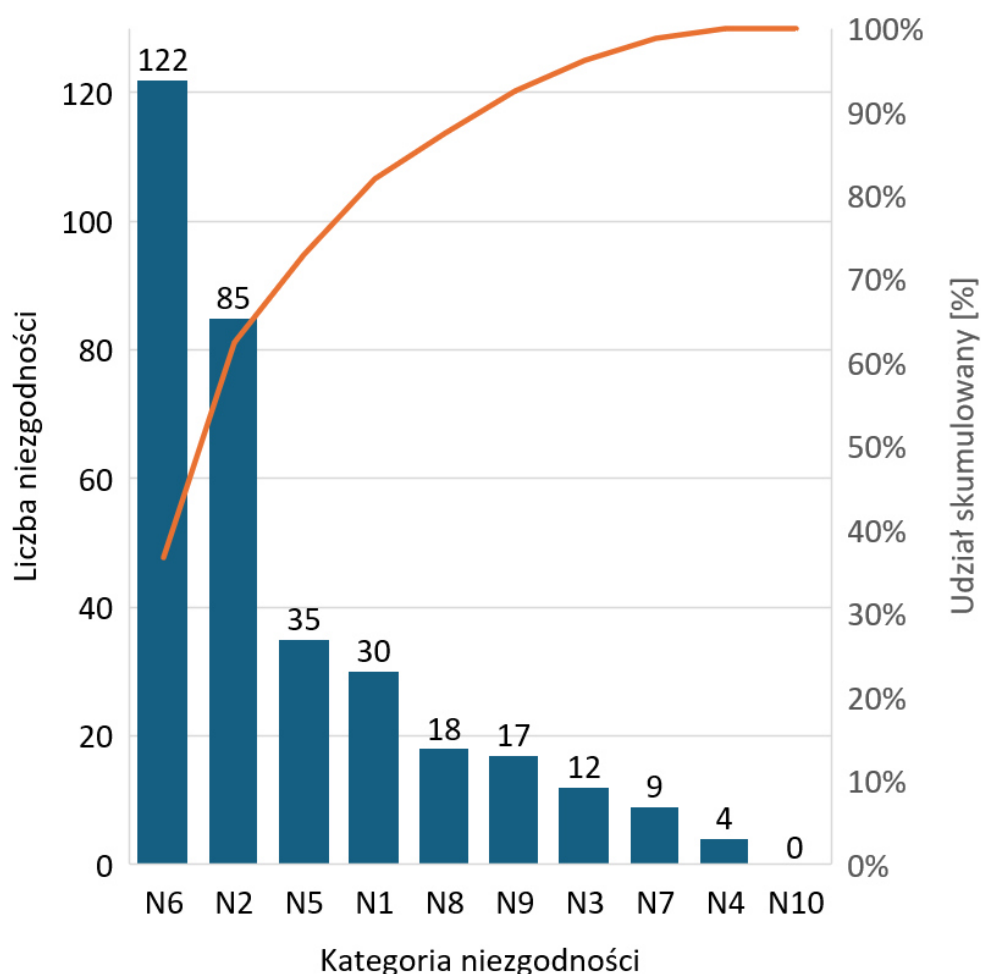


Rysunek 3.7.4.8. Analiza Pareto kategorii niezgodności zidentyfikowanych podczas pełnego wdrożenia DR 1.0, oznaczenia N1–N10 zgodnie z tabelą 3.7.4.1 (opracowanie własne)

Wykres Pareto (Rysunek 3.7.4.9) przedstawia rozkład niezgodności w poszczególnych kategoriach w fazie rozwoju produktu po etapie walidacji *Design Review 1.0*. Dane obejmują dziesięć kategorii od N1 do N10) i zaprezentowano je w układzie liczby niezgodności oraz udziału skumulowanego w procentach.

Największą liczbę niezgodności odnotowano w kategoriach niezgodności N6 – 122, co stanowi 36,7% oraz N2 – 85, co stanowi 25,6%. Razem obejmują one 207 niezgodności, co stanowi 62,3% wszystkich. Kolejne miejsca zajmują kategorie niezgodności N5 – 35, co stanowi 10,5% i N1 – 30, co stanowi 9,0%, a następnie kategorie niezgodności N8 – 18, co stanowi 5,4%, oraz N9 – 17, co stanowi 5,1%. Udział pozostałych kategorii niezgodności jest niewielki: N3 – 12, co stanowi 3,6%, N7 – 9, co stanowi 2,7%, N4 – 4, co stanowi 1,2%, natomiast kategoria niezgodności N10 nie wystąpiła.

Krzywa udziału skumulowanego wskazuje, że cztery pierwsze kategorie niezgodności (N6, N2, N5, N1) obejmują łącznie około 81,8% wszystkich. W analizie dominującą rolę pełnią więc kategorie niezgodności N6 i N2, których łączny udział przekracza 62% i jednoznacznie wyznaczają główny obszar koncentracji niezgodności.

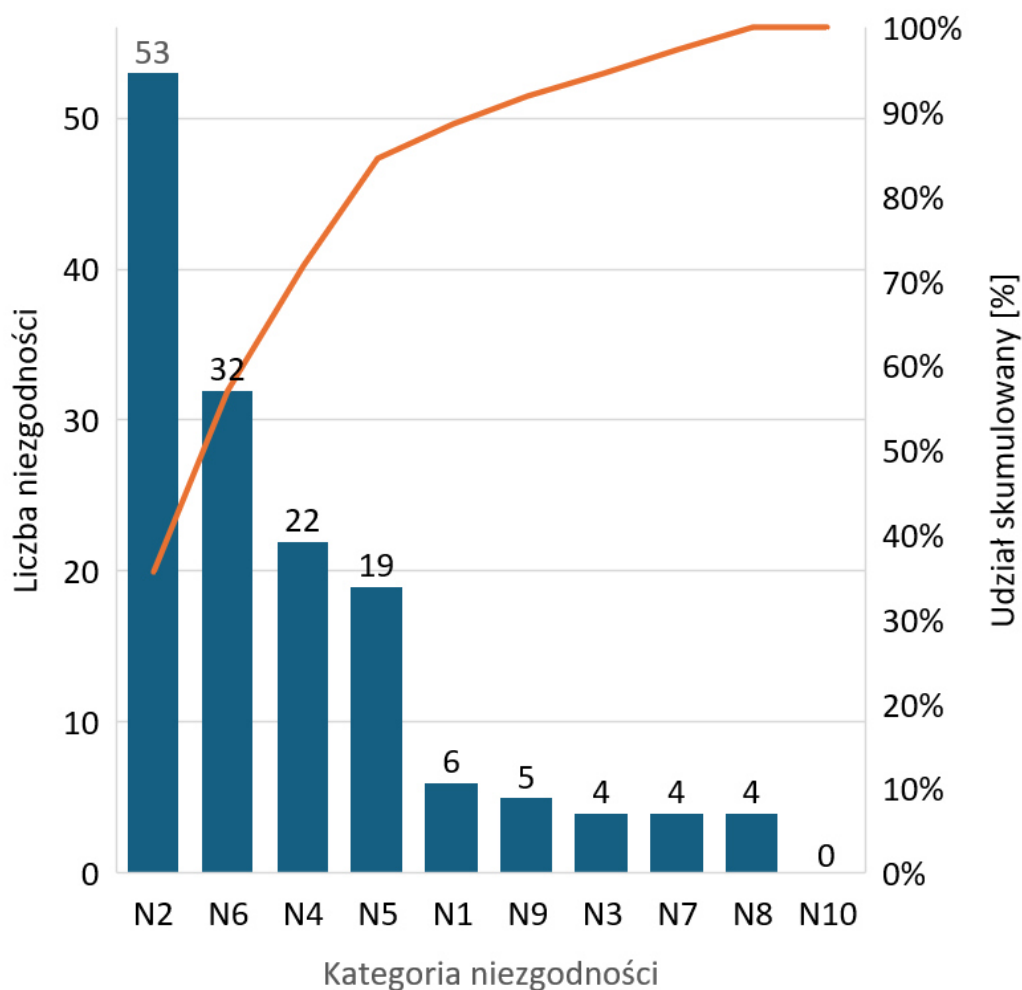


Rysunek 3.7.4.9. Analiza Pareto kategorii niezgodności występujących w fazie rozwoju produktu podczas pełnego wdrożenia DR 1.0, – oznaczenia N1–N10 zgodnie z tabelą 3.7.4.1 (opracowanie własne)

Wykres Pareto (Rysunek 3.7.4.10) przedstawia rozkład niezgodności w poszczególnych kategoriach w fazie walidacji produktu i rozwoju procesu po etapie walidacji *Design Review 1.0*. Dane obejmują dziesięć kategorii od N1 do N10, zaprezentowanych w układzie liczby przypadków oraz udziału skumulowanego w procentach.

Największą liczbę niezgodności odnotowano w kategoriach niezgodności N2 – 53, co stanowi 35,6% oraz N6 – 32, co stanowi 21,5%. Razem obejmują one 85 niezgodności, co odpowiada 57,1% wszystkich. Kolejne miejsca zajmują kategorie niezgodności N4 – 22, co stanowi 14,8% i N5 – 19, co stanowi 12,8%. Pozostałe kategorie mają znacznie niższy udział: N1 – 6, co stanowi 4,0%, N9 – 5, co stanowi 3,4% oraz N3, N7 i N8 – po 4, co stanowi 2,7%. Kategoria niezgodności N10 nie została odnotowana.

Krzywa udziału skumulowanego wskazuje, że cztery pierwsze kategorie niezgodności (N2, N6, N4, N5) obejmują łącznie około 85% wszystkich. W analizie dominującą rolę pełnią więc kategorie niezgodności N2 i N6, których łączny udział przekracza 57% i jednoznacznie wyznaczają główny obszar koncentracji niezgodności.



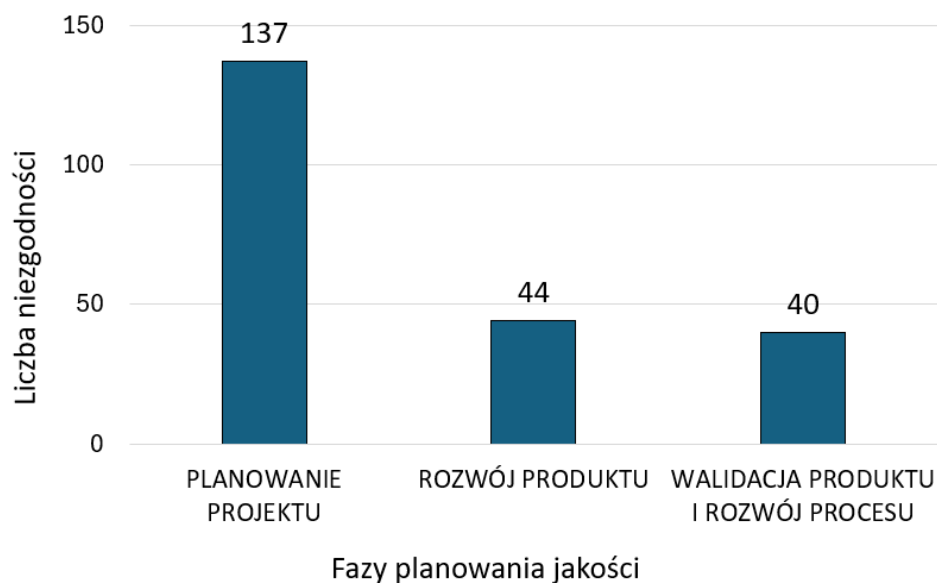
Rysunek 3.7.4.10. Analiza Pareto kategorii niezgodności występujących w fazie walidowania produktu i rozwoju procesu podczas pełnego wdrożenia DR 1.0, – oznaczenia N1–N10 zgodnie z tabelą 3.7.4.1 (opracowanie własne)

Rozwój i pierwsze wyniki Design Review wersja 2.0

Na podstawie doświadczeń wynikających z stosowania narzędzia Design Review 1.0 opracowano drugą wersję narzędzia – Design Review 2.0. Pierwsze 14 projektów dotyczących planowania jakości w których wykorzystano nową wersję wykazało, że proces przeglądów Design Review zyskał większą powtarzalność klasyfikacji między zespołami oraz poprawiła się jakość raportowania (Opis zmian pomiędzy wersją DR1 oraz DR2 w rozdziale 3.7.3 Ewolucja rozwoju instrumentu Design Review). Dane te stanowią wstępną ocenę skuteczności narzędzia DR 2.0, koncentrującą się na eliminacji niezgodności krytycznych przed wejściem do fazy walidacji produktu i procesu.

Dane uzyskane z pierwszych czternastu projektów (Rysunek 3.7.4.11) w których wykorzystano narzędzie *Design Review 2.0*, iż liczba przypadków odnotowana w fazie planowania projektu wynosi 137 niezgodności, co potwierdza, że na tym etapie koncentruje się główna część

identyfikowanych problemów. W fazie rozwoju produktu odnotowano 44 niezgodności, a w fazie walidacji produktu i rozwoju procesu – 40 niezgodności.

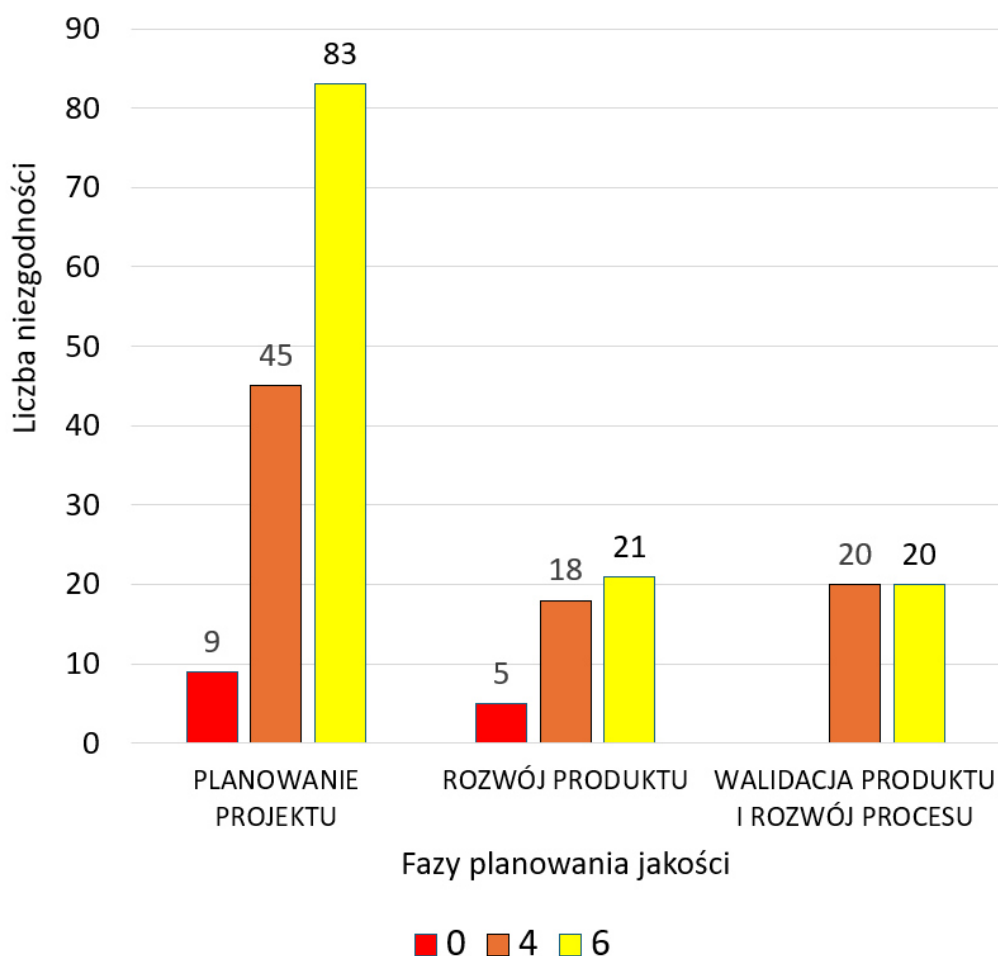


Rysunek 3.7.4.11. Liczba niezgodności w poszczególnych fazach planowania jakości – DR 2.0 (opracowanie własne)

Wykres (Rysunek 3.7.4.12) przedstawia liczbę i poziom niezgodności w poszczególnych fazach planowania jakości w ramach narzędzia *Design Review 2.0*. Dane zostały podzielone na trzy poziomy oceny – 0, 4 oraz 6 – zgodnie z ich wpływem na funkcje produktu końcowego (tabela 3.7.4.1).

W fazie planowania projektu odnotowano najwięcej niezgodności, w tym 9 na poziomie znaczenia 0, 45 na poziomie znaczenia 4 oraz aż 83 na poziomie znaczenia 6. W fazie rozwoju produktu zidentyfikowano łącznie 44 niezgodności, z czego 5 na poziomie znaczenia 0, 18 na poziomie znaczenia 4 i 21 na poziomie znaczenia 6. W fazie walidacji produktu i rozwoju procesu wystąpiło łącznie 40 niezgodności, rozkładających się równomiernie: 20 na poziomie znaczenia 4 oraz 20 na poziomie znaczenia 6.

Uzyskana struktura klasyfikacji wskazuje, że w zakresie wykorzystania narzędzi DR 2.0 dominujące niezgodności są ocenione na poziomie znaczenia 6 – związane głównie z obniżeniem komfortu użytkowania lub problemami wizualno-akustycznymi produktu, nie wpływającymi jednak na funkcję główną produktu końcowego. Niezgodności poważniejsze, klasyfikowane na poziomie znaczenia 4, pojawiają się we wszystkich fazach planowania jakości, z największą ich liczbą w fazie planowaniu projektu - 45 niezgodności. Najrzadziej identyfikowane były niezgodności krytyczne charakteryzujące się poziomem znaczenia 0, które łącznie wystąpiły 14 razy i koncentrowały się głównie w fazie planowania projektu- 9 niezgodności.



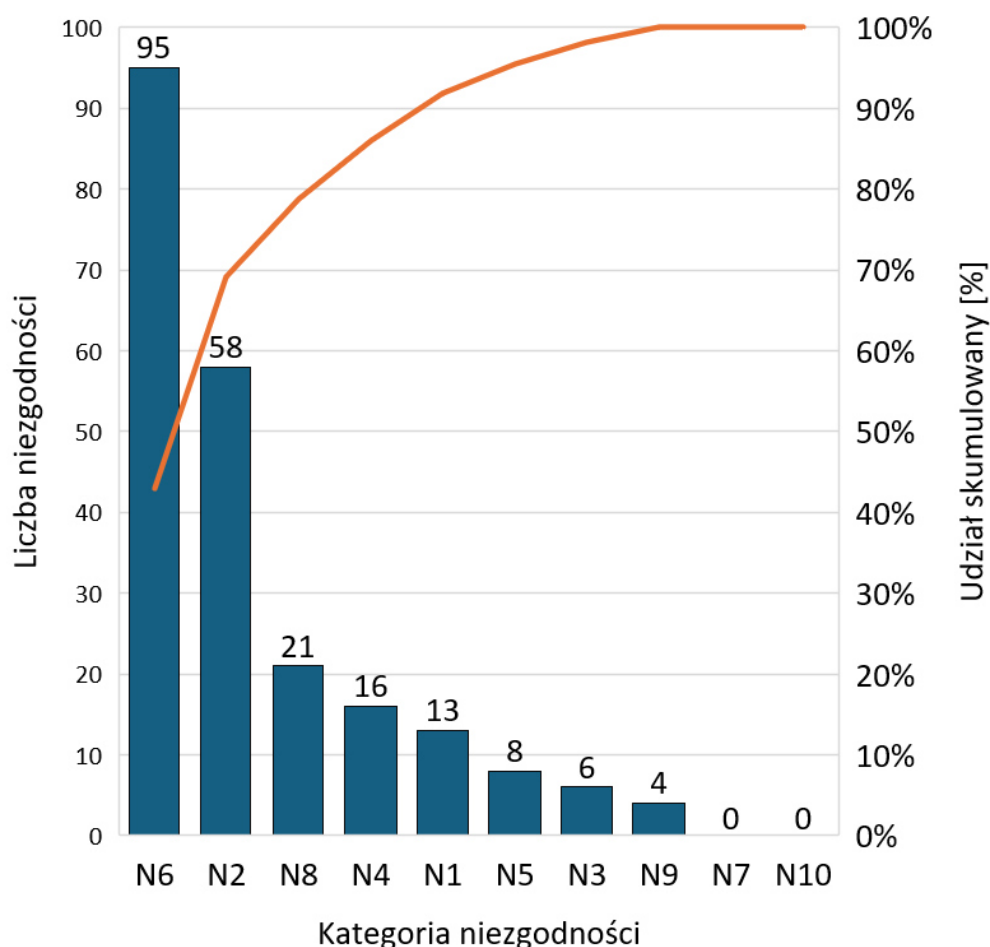
Rysunek 3.7.4.12. Liczba i poziom znaczenia niezgodności vs. fazy planowania jakości – DR 2.0 (opracowanie własne)

Wykres Pareto (Rysunek 3.7.4.13) przedstawia rozkład kategorii niezgodności zidentyfikowanych w ramach *Design Review 2.0*. Dane obejmują dziesięć kategorii od N1 do N10) i zostały zaprezentowane zarówno w układzie liczby niezgodności, jak i udziału skumulowanego w procentach.

Największą liczbę niezgodności odnotowano w kategoriach niezgodności N6 – 95, co stanowi 43,0% oraz N2 – 58, co stanowi 26,2%. Łącznie obejmują one 153 niezgodności, co odpowiada 69,2% wszystkich i jednoznacznie wskazuje na ich dominującą rolę. Kolejne miejsca zajmują kategorie niezgodności N8 – 21, co stanowi 9,5%, N4 – 16, co stanowi 7,2% oraz N1 – 13, co stanowi 5,9%. Razem te trzy kategorie stanowią dodatkowe 22,6% wszystkich niezgodności, co oznacza, że pięć pierwszych kategorii odpowiada za ponad 92% wszystkich.

Krzywa udziału skumulowanego wskazuje, że pięć pierwszych kategorii niezgodności (N6, N2, N8, N4, N1) obejmuje łącznie około 92% wszystkich. W analizie dominują więc kategorie

niezgodności N6 i N2, które łącznie odpowiadają za 69,2% wszystkich, a w połączeniu z kategoriami N8, N4 i N1 tworzą obszar koncentracji obejmujący niemal całość niezgodności.

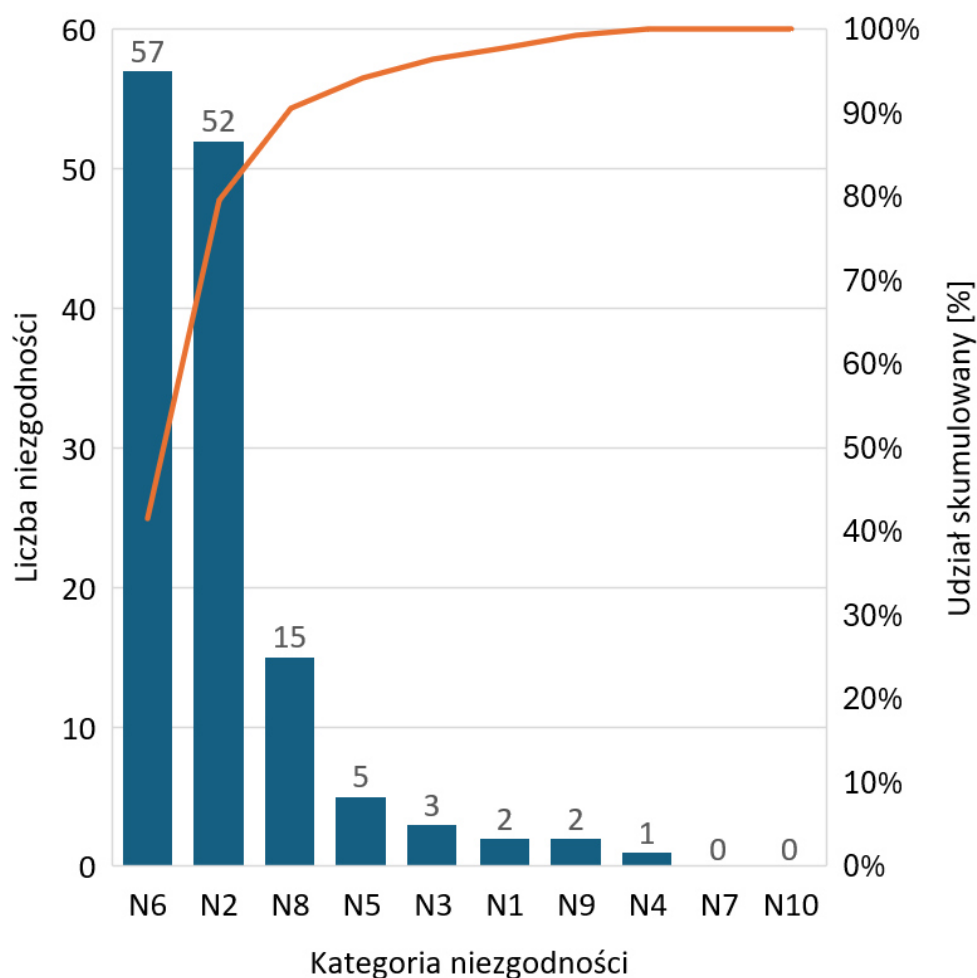


Rysunek 3.7.4.13. Analiza Pareto kategorii niezgodności zidentyfikowanych podczas użycia DR 2.0, – oznaczenia N1–N10 zgodnie z tabelą 3.7.4.1 (opracowanie własne)

Wykres Pareto (Rysunek 3.7.4.14) przedstawia rozkład kategorii niezgodności zidentyfikowanych w fazie planowania projektu w ramach *Design Review 2.0*. Dane obejmują dziesięć kategorii niezgodności od N1 do N10.

Największą liczbę niezgodności odnotowano w kategoriach niezgodności N6 – 57, co stanowi 41,6% oraz N2 – 52, co stanowi 38,0%. Kolejne miejsce zajmuje kategoria niezgodności N8 – 15, co stanowi 10,9%. Pozostałe kategorie mają marginalne znaczenie: N5 – 5, co stanowi 3,6%, N3 – 3, co stanowi 2,2%, N1 i N9 – po 2, co stanowi 1,5%, oraz N4 – 1, co stanowi 0,7%. Kategorie niezgodności N7 i N10 nie zostały odnotowane.

Krzywa udziału skumulowanego wskazuje, że trzy pierwsze kategorie niezgodności (N6, N2, N8) obejmują łącznie około 90,5% wszystkich. W analizie dominującą rolę pełnią kategorie niezgodności N6 i N2, które razem liczą 109 niezgodności, co odpowiada 79,6% całości i wyznacza główny obszar koncentracji problemów jakościowych w fazie planowania projektu.

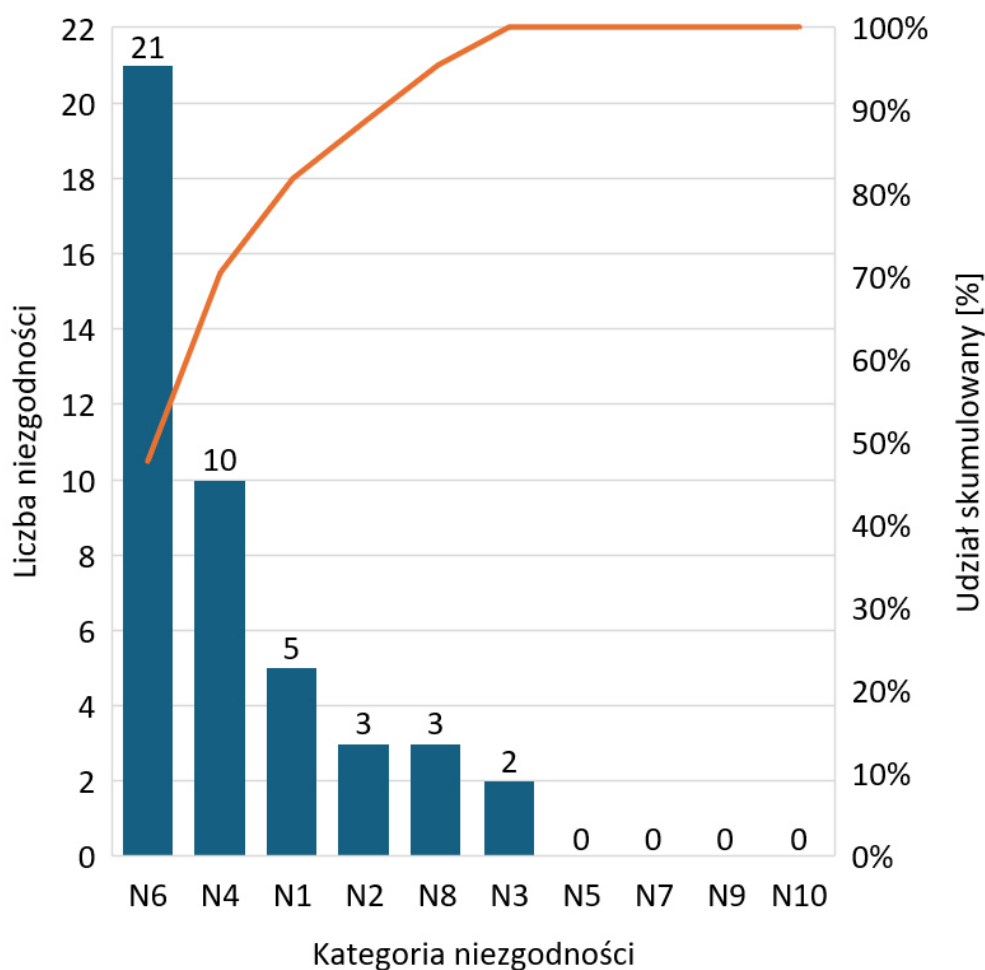


Rysunek 3.7.4.14. Analiza Pareto kategorii niezgodności występujących w fazie planowania projektu – DR 2.0, – oznaczenia N1–N10 zgodnie z tabelą 3.7.4.1 (opracowanie własne)

Wykres Pareto (Rysunek 3.7.4.15) przedstawia rozkład niezgodności w fazie rozwoju produktu w ramach *Design Review 2.0*. Dane obejmują dziesięć kategorii od N1 do N10, zaprezentowanych w układzie liczby przypadków oraz udziału skumulowanego w procentach.

Największą liczbę niezgodności odnotowano w kategorii niezgodności N6 – 21, co stanowi 47,7%, a następnie w kategorii niezgodności N4 – 10, co stanowi 22,7%. Razem te dwie kategorie obejmują 31 niezgodności, co odpowiada 70,4% wszystkich. Kolejne miejsca zajmują kategorie niezgodności N1 – 5, co stanowi 11,4%, N2 – 3, co stanowi 6,8% oraz N8 – 3, co stanowi 6,8%. Najmniejszy udział ma kategoria niezgodności N3 – 2, co stanowi 4,5%, natomiast dla kategorii niezgodności N5, N7, N9 i N10 nie odnotowano wystąpień.

Krzywa udziału skumulowanego wskazuje, że pięć pierwszych kategorii niezgodności (N6, N4, N1, N2, N8) obejmuje łącznie ponad 95% wszystkich. W analizie dominującą rolę pełni kategoria niezgodności N6, która wraz z kategorią N4 odpowiada za ponad 70% całości i wyznacza główny obszar koncentracji problemów jakościowych w fazie rozwoju produktu.

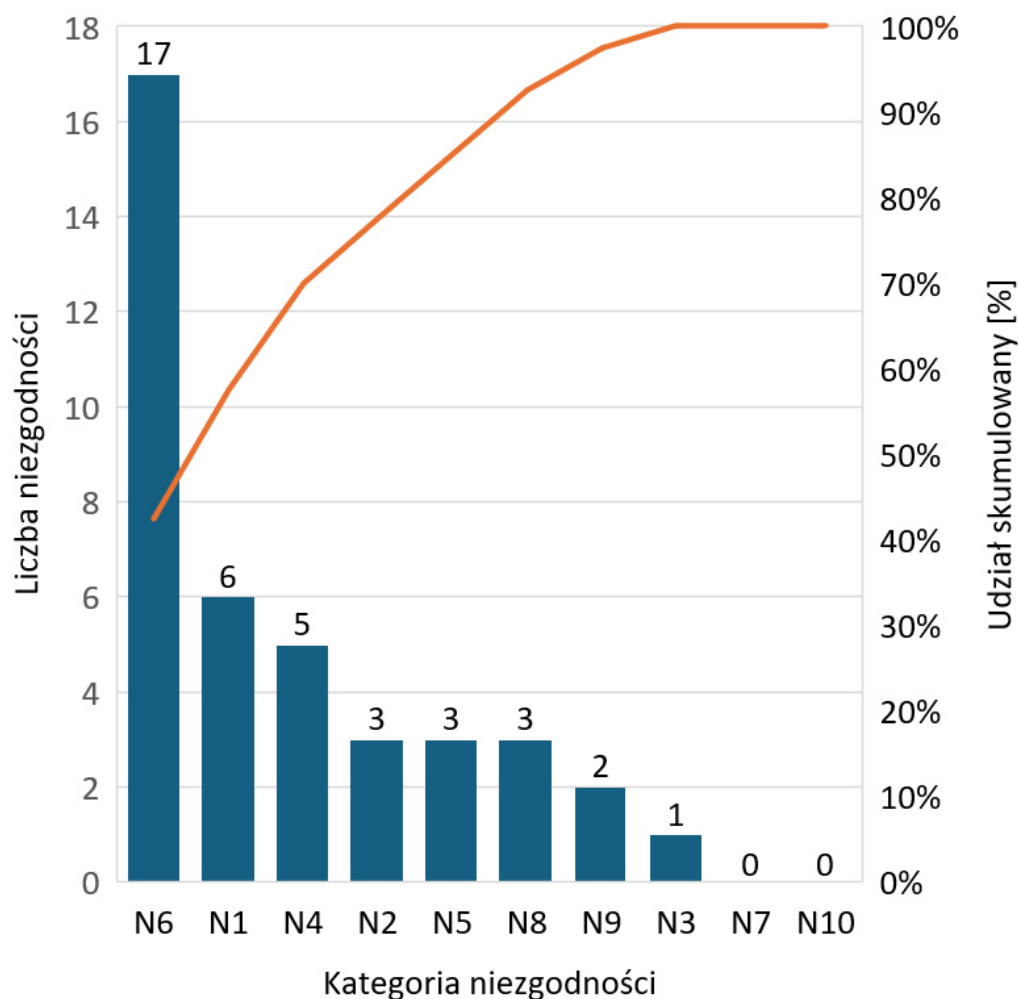


Rysunek 3.7.4.15. Analiza Pareto kategorii niezgodności występujących w fazie rozwoju produktu – DR 2.0, – oznaczenia N1–N10 zgodnie z tabelą 3.7.4.1 (opracowanie własne)

Wykres Pareto (Rysunek. 3.7.4.16) przedstawia rozkład niezgodności w fazie walidacji produktu i rozwoju procesu w ramach zastosowania *Design Review 2.0*. Dane obejmują dziesięć kategorii (N1–N10).

Największą liczbę niezgodności odnotowano w kategorii niezgodności N6 – 17, co stanowi 42,5%. Kolejne miejsca zajmują kategorie niezgodności N1 – 6, co stanowi 15,0% oraz N4 – 5, co stanowi 12,5%. Niższy udział mają kategorie niezgodności N2, N5 i N8 – po 3, co stanowi 7,5%. Pozostałe kategorie osiągnęły marginalne wartości: N9 – 2, co stanowi 5,0% oraz N3 – 1, co stanowi 2,5%, natomiast kategorie niezgodności N7 i N10 nie zostały odnotowane.

Krzywa udziału skumulowanego wskazuje, że trzy pierwsze kategorie niezgodności (N6, N1, N4) obejmują łącznie około 70% wszystkich. W analizie dominującą rolę pełni kategoria niezgodności N6, która w połączeniu z kategoriami N1 i N4 wyznacza główny obszar koncentracji problemów jakościowych w tej fazie.



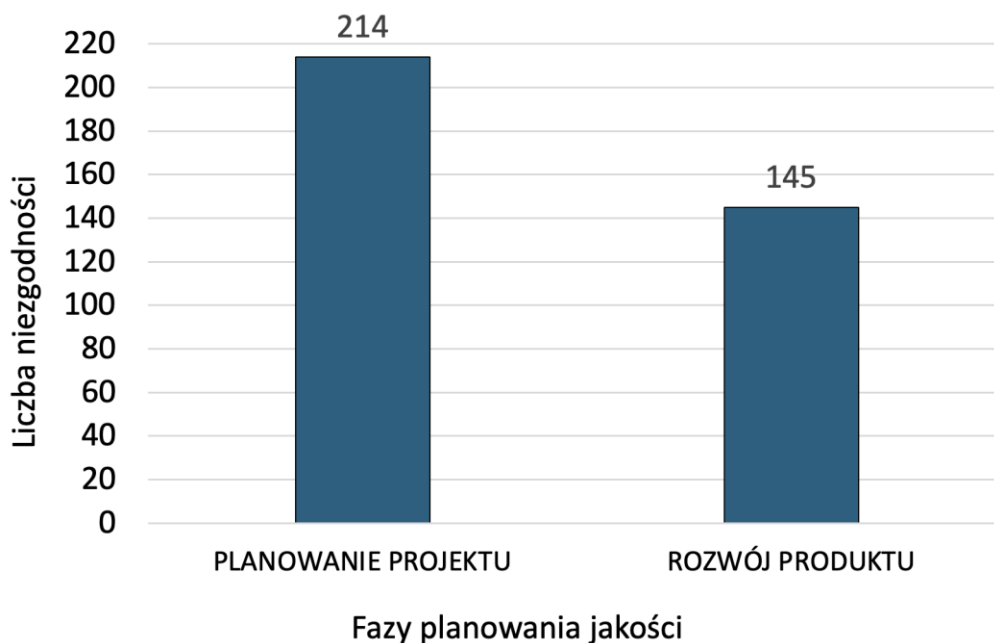
Rysunek 3.7.4.16. Analiza Pareto kategorii niezgodności występujących w fazie walidacji produktu i rozwoju procesu – DR 2.0, – oznaczenia N1–N10 zgodnie z tabelą 3.7.4.1 (opracowanie własne)

Wykorzystanie Design Review dla dokumentacji technicznej produktów konwencjonalnych

Zastosowanie narzędzia *Design Review* w odniesieniu do amortyzatorów konwencjonalnych miało charakter uzupełniający przeprowadzane badania i analizy, służyły weryfikacji jego skuteczności i efektywności poza obszarem produktów mechatronicznych. Analiza dokumentacji technicznej w tym segmencie pozwoliła ocenić, w jakim stopniu narzędzie opracowane z myślą o bardziej złożonych rozwiązaniach może wspierać identyfikację niezgodności również w projektach o prostszej architekturze.

Wykres (Rysunek 3.7.4.17) przedstawia liczbę niezgodności w poszczególnych fazach planowania jakości dla amortyzatorów konwencjonalnych, analizowanych z wykorzystaniem narzędzia *Design Review 2.0*. Dane obejmują dwie kluczowe fazy: planowanie projektu oraz rozwój produktu.

Najwięcej niezgodności zostało zidentyfikowanych w fazie planowania projektu – 214, co wskazuje, że na tym etapie koncentruje się główna część problemów jakościowych. W fazie rozwoju produktu odnotowano 145 niezgodności, czyli istotnie mniej niż w fazie wcześniejszej, jednak nadal stanowiących znaczącą część sumy niezgodności. Analiza struktury niezgodności wskazuje, że w badanym okresie łączna ich liczba wyniosła 359. z tego 214 przypadków (ok. 60%) zidentyfikowano na etapie planowania projektu, natomiast 145 przypadków (ok. 40%) odnotowano w fazie rozwoju produktu.

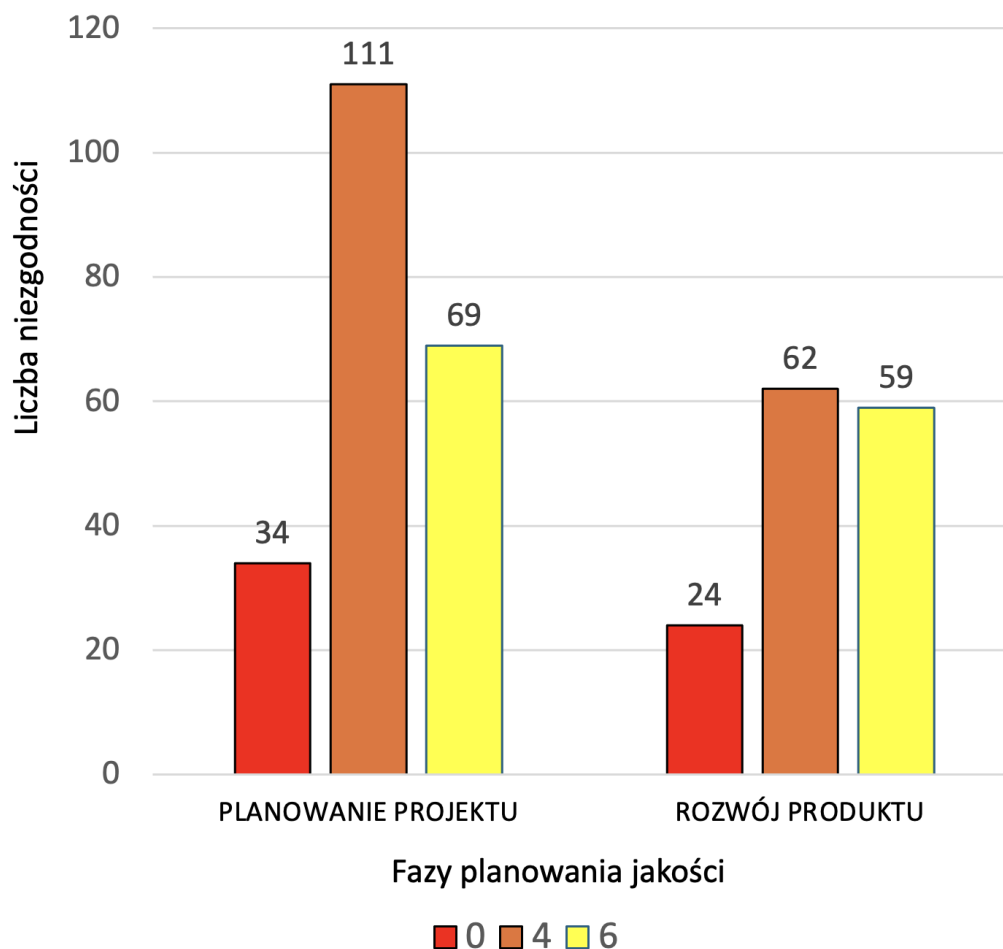


Rysunek 3.7.4.17. Liczba niezgodności w poszczególnych fazach planowania jakości dla amortyzatorów konwencjonalnych – DR 2.0 (opracowanie własne)

Wykres (Rysunek 3.7.4.18) przedstawia liczbę i poziom niezgodności w poszczególnych fazach planowania jakości dla amortyzatorów konwencjonalnych w ramach *Design Review 2.0*. Dane podzielono na trzy poziomy znaczenia: 0, 4 oraz 6.

W fazie planowania projektu odnotowano łącznie 214 niezgodności, z czego 34 na poziomie znaczenia 0, 111 na poziomie znaczenia 4 oraz 69 na poziomie znaczenia 6. W fazie rozwoju produktu liczba niezgodności wyniosła 145, w tym 29 na poziomie znaczenia 0, 67 na poziomie znaczenia 4 oraz 59 na poziomie znaczenia 6.

Struktura niezgodności wskazuje, że w obydwu fazach planowania jakości dominowały niezgodności ocenione na poziomie znaczenia 4 (173 przypadki łącznie), odzwierciedlające wpływ na funkcje drugorzędne produktu końcowego. Istotny udział miały także niezgodności zaklasyfikowane na poziomie znaczenia 6 (128 przypadków łącznie), związane z obniżeniem komfortu użytkowania. Najrzadziej występowały niezgodności krytyczne, sklasyfikowane na poziomie znaczenia 0 (58 przypadków).

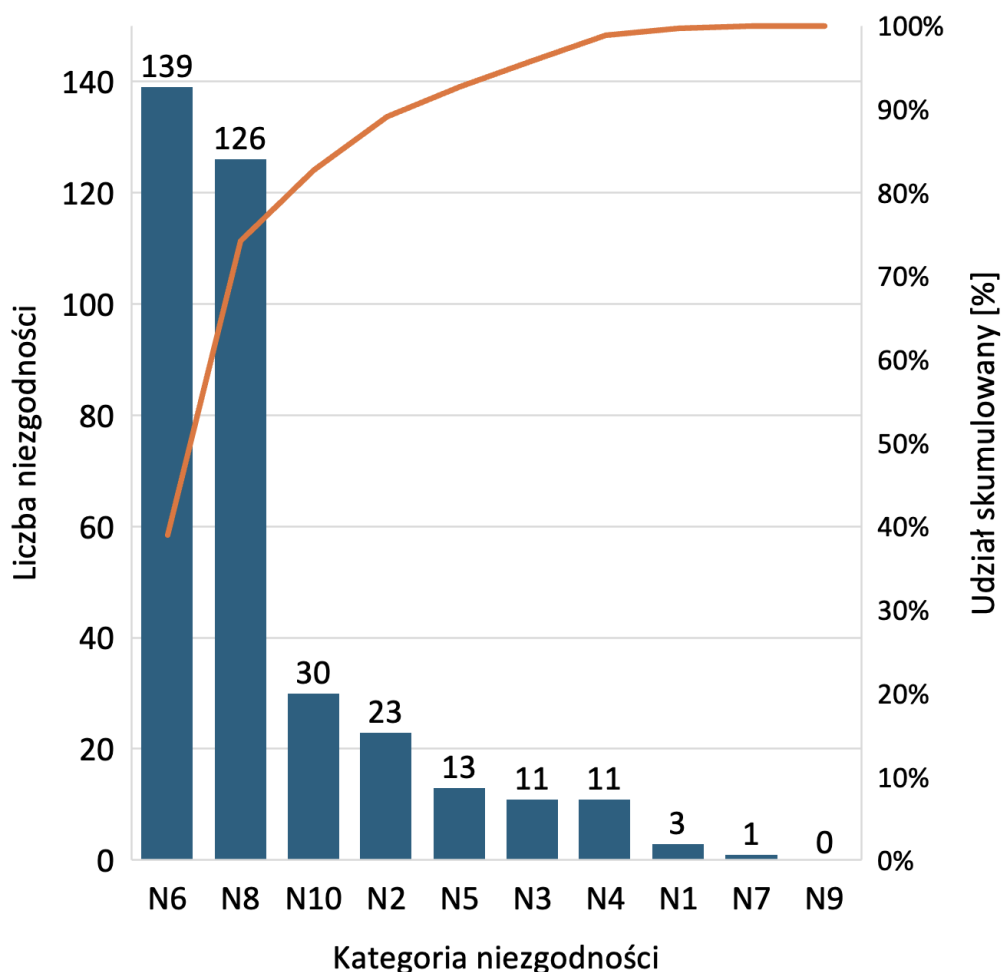


Rysunek 3.7.4.18. Liczba i poziom znaczenia niezgodności vs. fazy planowania jakości dla amortyzatorów konwencjonalnych – DR 2.0 (opracowanie własne)

Wykres Pareto (Rysunek 3.7.4.19) przedstawia zbiorcze zestawienie wszystkich niezgodności zidentyfikowanych w ramach *Design Review 2.0* dla amortyzatorów konwencjonalnych. Dane obejmują dziesięć kategorii niezgodności od N1 do N10)

Największą liczbę niezgodności odnotowano w kategoriach N6 – 139, co stanowi 34,4% oraz N8 – 126, co stanowi 31,2%. Łącznie obejmują one 265 niezgodności, co odpowiada 65,6% wszystkich i jednoznacznie wskazuje na ich dominującą rolę w analizie problemów jakościowych. Kolejne miejsce zajmuje kategoria N10 – 30, co stanowi 7,4%, a następnie N2 – 23, co stanowi 5,7%, N5 – 13, co stanowi 3,2%, N3 – 11, co stanowi 2,7% oraz N4 – 11, co stanowi 2,7%. Mniejszy udział mają kategorie N1 – 3, co stanowi 0,7% oraz N7 – 1, co stanowi 0,2%, podczas gdy kategoria N9 nie została odnotowana.

Krzywa udziału skumulowanego wskazuje, że trzy pierwsze kategorie niezgodności (N6, N8, N10) obejmują łącznie ponad 73% wszystkich, a pięć pierwszych (do N2 włącznie) – blisko 79%. W analizie dominującą rolę pełnią kategorie N6 i N8, które razem obejmują 265 niezgodności, co odpowiada 65,6% całości i wyznacza główny obszar koncentracji problemów jakościowych.

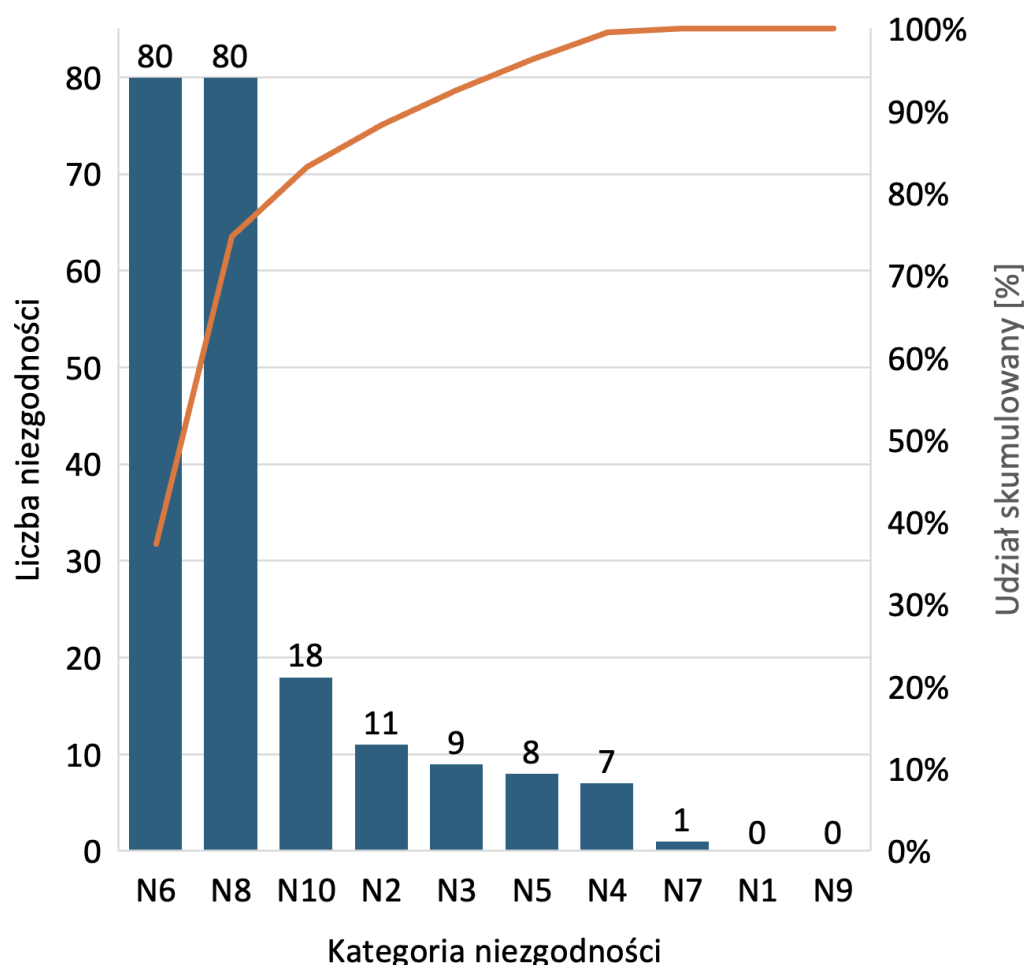


Rysunek 3.7.4.19. Analiza Pareto niezgodności dla amortyzatorów konwencjonalnych – DR 2.0, – oznaczenia N1–N10 zgodnie z tabelą 3.7.4.1 (opracowanie własne)

Wykres Pareto (Rysunek 3.7.4.20) przedstawia rozkład niezgodności w fazie planowania projektu dla amortyzatorów konwencjonalnych analizowanych w ramach *Design Review 2.0*. Dane obejmują dziesięć kategorii niezgodności od N1 do N10).

Największą liczbę niezgodności odnotowano w kategoriach N6 – 80, co stanowi 35,1% oraz N8 – 80, co stanowi 35,1%. Wystąpiły one z identyczną częstotliwością i łącznie obejmują 160 niezgodności, co stanowi 70,2% wszystkich. Kolejne miejsca zajmują kategorie N10 – 18, co stanowi 7,9% oraz N2 – 11, co stanowi 4,8%. Udział pozostałych kategorii był niższy: N3 – 9, co stanowi 3,9%, N5 – 8, co stanowi 3,5%, N4 – 7, co stanowi 3,1% oraz N7 – 1, co stanowi 0,4%. Kategorie N1 i N9 nie zostały odnotowane.

Krzywa udziału skumulowanego wskazuje, że trzy pierwsze kategorie niezgodności (N6, N8, N10) obejmują łącznie około 78% wszystkich, a pięć pierwszych (do N2 włącznie) – blisko 83%. W analizie dominującą rolę pełnią kategorie N6 i N8, które razem odpowiadają za ponad 70% całości i stanowią główny obszar koncentracji problemów jakościowych w fazie planowania projektu.

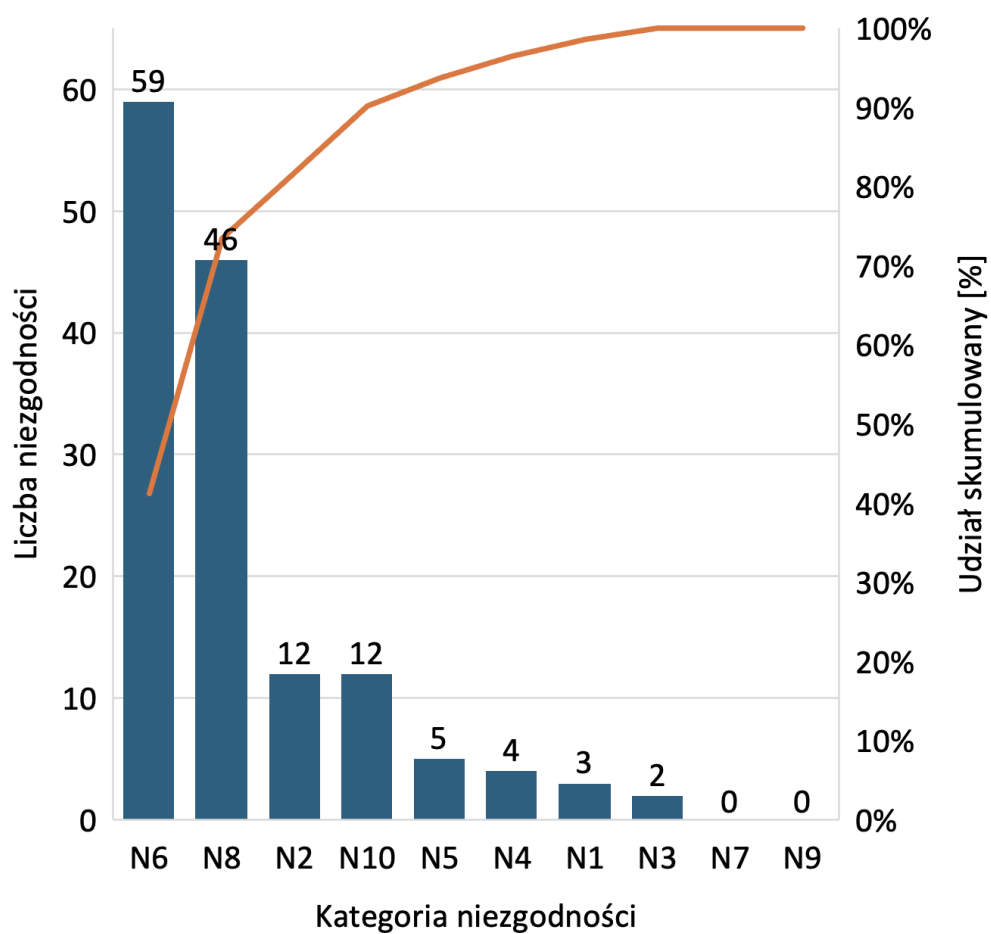


Rysunek 3.7.4.20 Analiza Pareto kategorii niezgodności występujących w fazie planowania projektu dla amortyzatorów konwencjonalnych – DR 2.0, oznaczenia N1–N10 zgodnie z tabelą 3.7.4.1 (opracowanie własne)

Wykres (rys 3.7.4.21) Pareto przedstawia rozkład niezgodności w fazie rozwoju produktu dla amortyzatorów konwencjonalnych, analizowanych w ramach *Design Review 2.0*. Dane obejmują dziesięć kategorii (N1–N10), zaprezentowanych w układzie liczby niezgodności oraz udziału skumulowanego w procentach.

Największą liczbę niezgodności odnotowano w kategoriach N6 – 59, co stanowi 38,3% oraz N8 – 46, co stanowi 29,9%. Łącznie obejmują one 105 niezgodności, co stanowi 68,2% wszystkich i jednoznacznie wskazuje na ich dominującą rolę. Kolejne miejsca zajmują kategorie N2 – 12, co stanowi 7,8% oraz N10 – 12, co stanowi 7,8%. Mniejszy udział miały kategorie N5 – 5, co stanowi 3,2%, N4 – 4, co stanowi 2,6%, N1 – 3, co stanowi 1,9% oraz N3 – 2, co stanowi 1,3%, podczas gdy kategorie N7 i N9 nie zostały odnotowane.

Krzywa udziału skumulowanego wskazuje, że cztery pierwsze kategorie niezgodności (N6, N8, N2, N10) obejmują łącznie około 84% wszystkich. W analizie dominującą rolę pełnią kategorie N6 i N8, które razem odpowiadają za ponad 68% całości i stanowią główny obszar koncentracji problemów jakościowych w fazie rozwoju produktu.



Rysunek 3.7.4.21. Analiza Pareto kategorii niezgodności występujących w fazie rozwoju produktu dla amortyzatorów konwencjonalnych – DR 2.0, oznaczenia N1–N10 zgodnie z tabelą 3.7.4.1 (opracowanie własne)

3.7.5 Wprowadzenie do instrumentu Problem Definition Tool

Problem Definition Tool (PDT) jest autorskim narzędziem wspierającym proces planowania jakości stosowany w obszarze rozwoju produktu i procesu, mający na celu wspieranie procesu problem solving w zakresie zbierania i prezentacji danych. Jego podstawową funkcją jest zapewnienie, aby wszystkie niezgodności były prezentowane w jednolity sposób podczas cotygodniowych spotkań zespołów projektowych i problem solving. Każdy temat jest omawiany według tego samego schematu, a osoby zaangażowane w projekt otrzymują spójny i przejrzysty obraz aktualnej sytuacji oparty na zebranych danych. PDT ułatwia proces komunikacji pomiędzy członkami zespołu, pozwala szybciej uchwycić istotę analizowanych niezgodności i zapewnia bieżące śledzenie statusu działań z nimi związanych. PDT nie zastępuje narzędzi przeznaczonych do analizy przyczyn niezgodności ani metod wspierających rozwój produktu, lecz pełni rolę porządkującą, wizualizującą i raportową, koncentrując się na porządkowaniu informacji, co umożliwi ich porównywanie pomiędzy projektami.

W praktyce planowania jakości i rozwoju produktu stosowanych jest wiele rodzajów formularzy typu „one-pager”, których celem jest syntetyczne ujęcie problemu i prowadzenie zespołu przez proces jego rozwiązywania. Do najczęściej stosowanych należą: arkusz A3 wykorzystywany w podejściu Lean, raport analizy 8D stosowane w branży motoryzacyjnej, karty analizy przyczyn źródłowych oparte na metodzie 5Why czy formularze wspierające cykl DMAIC w Six Sigma. Wszystkie te rozwiązania łączy ustrukturyzowany układ, który zapewnia spójność dokumentowania i ułatwia komunikację w zespole projektowym, oraz efektywne prezentowanie analizowanych danych.

Jednocześnie doświadczenia praktyczne autora wskazują, że żadne z tych narzędzi nie jest w pełni uniwersalne w kontekście gotowości do natychmiastowego użycia. Różnią się zakresem, poziomem szczegółowości oraz stopniem integracji z procesami rozwojowymi. Dlatego ich efektywność zależy od dopasowania do charakteru produktu (np. proste części mechaniczne vs. systemy mechatroniczne), specyfiki organizacji (np. struktura zespołów, sposób raportowania, doświadczenie zespołu) oraz kontekstu procesu (np. faza APQP, rodzaj niezgodności). w tym kontekście stosowanie narzędzi dostosowanych do potrzeb danej organizacji pozwala nie tylko zagwarantować skuteczność procesu rozpatrywania niezgodności, ale także zapewnia spójność pomiędzy codzienną praktyką inżynierską a wymaganiami np. systemu zarządzania jakością.

Impulsem do opracowania formularza PDT była obserwacja, że w praktyce przedsiębiorstwa, w którym realizowany był doktorat nie było jednolitego podejścia do opisu i prezentacji niezgodności. Inżynierowie posługiwali się różnymi formami zapisu – od arkuszy Excel i prezentacji PowerPoint, po ustne zgłoszenia problemów podczas spotkań. Prowadziło to do fragmentaryczności pozyskiwanych i analizowanych danych, trudności w porównywaniu analizowanych niezgodności i częstej konieczności powtarzania tych samych dyskusji. Niejednoznaczny sposób przedstawiania informacji skutkował również niepotrzebnym

kierowaniem wielu tematów do procesu eskalacji RYG, co obciążało procesy decyzyjne i spowalniało reakcję organizacji na faktycznie istotne problemy.

Celem stosowania formularz PDT jest wyeliminowanie ww. niespójności poprzez ujednolicenie formy opisu i prezentacji niezgodności. w wyniku standaryzacji formularz PDT każda niezgodności jest przedstawiana w uporządkowany sposób, co pozwala na szybszą klasyfikację omawianych tematów i usprawnia przebieg spotkań. PDT wspiera proces decyzyjny poprzez eliminację dowolności i przypadkowości w procesie komunikacji, dostarczając wszystkim członkom zespołu tych samych informacji w porównywalnym układzie ich prezentacji. w efekcie zmniejsza się liczba eskalacji, które wynikają nie z rzeczywistej wagi niezgodności, lecz ze sposobu jej opisanie. Podczas cotygodniowych spotkań zespołów projektowych, na których prezentowane są działania związane z usunięciem niezgodności, wymiana doświadczeń oraz udział innych zespołów umożliwiają sprawne rozpoznawanie i eliminowanie trudności podczas analizowania i rozwiązywania niezgodności pojawiających się w trakcie realizacji procesów, dzięki wykorzystaniu wspólnej wiedzy oraz wypracowanych rozwiązań.

Aby lepiej uargumentować przyczyny opracowania narzędzia PDT, zidentyfikowane podczas badań trudności w analizowaniu, rozwiązywaniu oraz komunikowaniu niezgodności zostały podzielone na czynniki organizacyjne, procesowe i strategiczne. Taki podział pozwala wskazać, które problemy wynikały z uwarunkowań pracy zespołowej, które ze sposobu przepływu informacji, a które były związane z długofalowym rozwojem organizacji.

Czynniki organizacyjne

Opis: związane z ludźmi, sposobem pracy zespołów i kulturą organizacyjną.

Krótki staż i rotacja pracowników:

- brak doświadczenia w prowadzeniu projektów rozwojowych,
- problemy z interpretacją wymagań i opisywaniem niezgodności.

Konsekwencja: niska jakość opisu niezgodności, trudności w analizie niezgodności.

Forma spotkań zespołów projektowych, na których prezentowano niezgodności:

- każdy inżynier prezentował niezgodności w innym formacie (ustnie, Excel, PowerPoint),
- różny poziom szczegółowości i brak jednolitej struktury prezentacji.

Konsekwencja: brak porównywalności tematów, wydłużone dyskusje, powtarzanie tych samych pytań.

Czynniki procesowe

Opis: związane z brakiem standardu w przepływie informacji.

Brak jednolitego sposobu opisu danych wejściowych i zakłóceń:

- brak systematycznego podejścia do sposobu opisywania niezgodności

Konsekwencja: niejasności co do istoty niezgodności, trudności w klasyfikacji.

Rozproszone źródła danych:

- informacje gromadzone w różnych narzędziach i dokumentach,
- część ustnie, część w arkuszach i prezentacjach.

Konsekwencja: utrata wiedzy, brak ciągłości informacji, powtarzalność błędów w projektach.

Brak narzędzia do monitorowania statusu tematów

- brak jasnej informacji: kto odpowiada, co już zrobiono, jaki jest status.

Konsekwencja: tematy przeciągają się, wracają na kolejne spotkania, trudno śledzić postęp.

Czynniki strategiczne

Opis: związane z długofalowym rozwojem organizacji i możliwością doskonalenia procesów.

Brak spójnej bazy wiedzy i Lessons Learned:

- brak standaryzowanych zapisów,
- trudności w wyciąganiu wniosków i transferze wiedzy między projektami.

Konsekwencja: powtarzalność tych samych błędów, brak narzędzi do nauki organizacyjnej.

Zakres stosowania formularz PDT obejmuje wszystkie fazy planowania jakości projektu, zgodnie z logiką APQP realizowaną w organizacji w ramach systemu Ten PLUS. Narzędzie wykorzystywane jest zarówno w fazie planowania i definiowania wymagań, podczas rozwoju konstrukcji i procesu, jak i na etapie walidacji oraz przygotowania do uruchomienia produkcji seryjnej. w każdej z tych faz PDT pozwala rejestrować i prezentować niezgodności w jednolitym układzie, niezależnie od ich źródła. Szczególnie ważne jest jego zastosowanie w przypadku niespełnienia wymagań klienta lub dostawcy oraz w procesie eskalacji projektowej – jednolity opis i klasyfikacja pozwalają rozróżnić tematy, które mogą być rozwiązane lokalnie, od tych wymagających zaangażowania szerszego grona ekspertów i decydentów.

Badania nad zastosowaniem PDT były prowadzone w okresie od czerwca 2022 do lutego 2024 roku i obejmowały wyłącznie obszar rozwoju amortyzatorów sterowanych elektronicznie. Analizą objęto 15 niezgodności, każda analizowana w osobnym formularzu PDT. Dodatkowym ograniczeniem była różnorodność doświadczeń i poziomu przeszkolenia uczestników – stopień zrozumienia formularza PDT oraz jakość jego wypełniania znacząco się różniły (kompletność). Wskazane ograniczenia mogły wpływać na porównywalność zebranych danych oraz na jednoznaczność interpretacji wskaźników, co uwzględniono przy ocenie wyników badań.

Rysunek 3.7.5.1 przedstawia integrację narzędzia Problem Definition Tool (PDT) w ramach systemu planowania jakości Ten PLUS stosowanego w Tenneco Gliwice. Schemat obrazuje

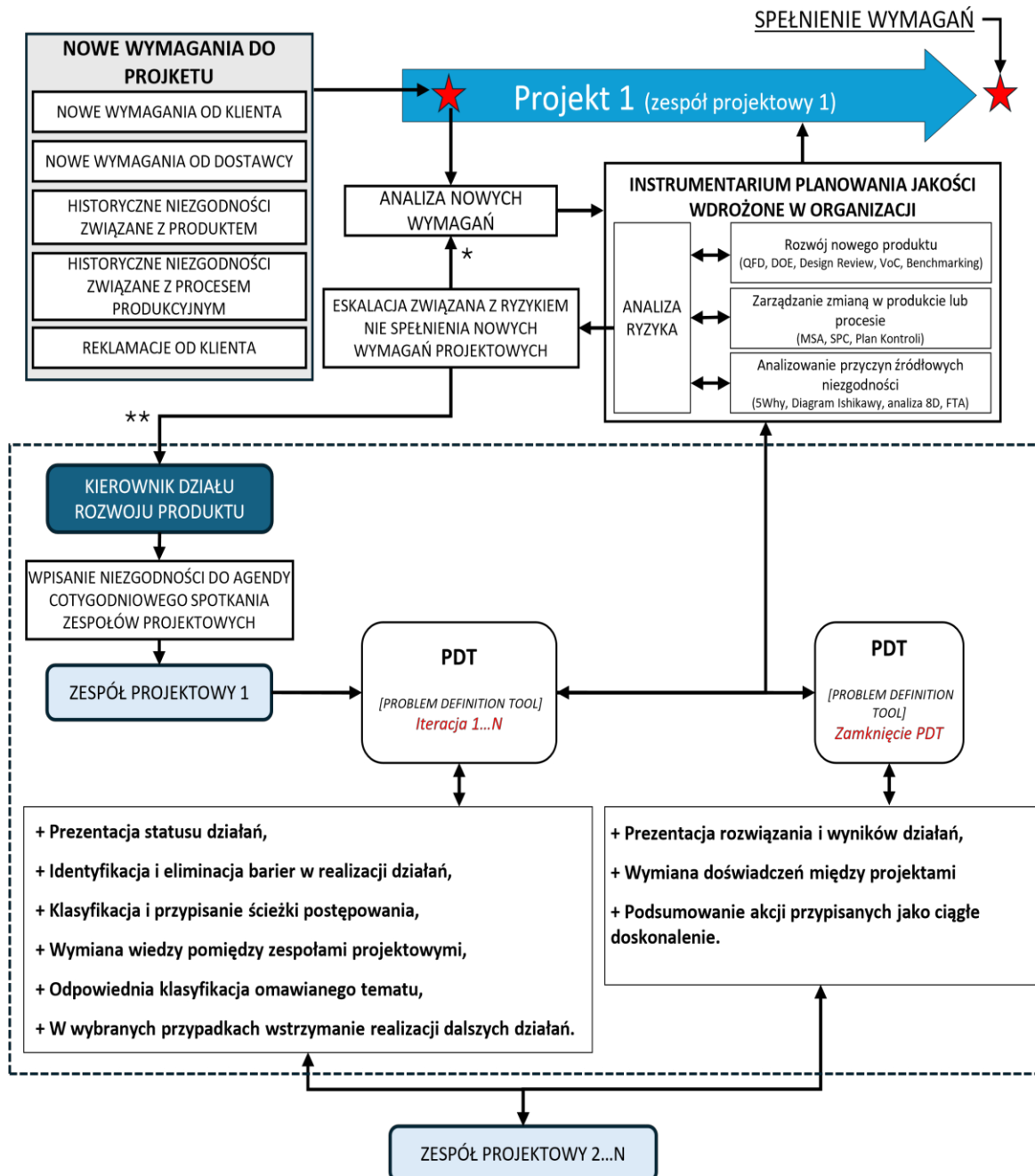
sposób, w jaki PDT wspiera proces zarządzania niezgodnościami i wymaganiami projektowymi, a także jego powiązania z procedurami eskalacji. Układ graficzny uwzględnia zarówno iteracyjny charakter spotkań projektowych, podczas których zagadnienia są prezentowane i analizowane, jak i ścieżki eskalacji – do ponownej analizy wymagań lub na wyższy poziom decyzyjny. Schemat ilustruje miejsce zastosowania formularza PDT w procesie planowania jakości i jego rolę w filtrowaniu oraz przekazywaniu informacji do dalszych analiz wspartych stosowanym w Tenneco instrumentarium jakościowym.

Na schemacie (rys. 3.7.5.1) strzałka oznaczona ** przedstawia proces eskalacji zagadnienia na wyższy poziom decyzyjny, tj. przekierowanie do Kierownika Działu Rozwoju. Mechanizm ten został wbudowany w system Ten PLUS, aby zapewnić, że niezgodności o podwyższonym ryzyku, mające istotny wpływ na bezpieczeństwo, zgodność z wymaganiami klienta lub wykonalność projektu, nie pozostaną nierozstrzygnięte w ramach pracy zespołu projektowego. Eskalacja ma na celu wsparcie zespołu w podejmowaniu decyzji, które wykraczają poza jego bieżące kompetencje lub możliwości zasobowe.

Proces eskalacji jest aktywowany w sytuacjach, gdy analiza ryzyka FMEA wskazuje na przekroczenie dopuszczalnych wartości, tj.:

- **RPN (Risk Priority Number)** > RPN większy niż ustalony dla danego projektu lub Action Priority (AP) = High z równoczesnym brakiem możliwości podjęcia działań, które mogłyby skutecznie obniżyć tę wartość,
- **Severity = 9 lub 10**, i brak możliwości zmian w projekcie redukujących wartość liczby kryterialnej (Severity może być obniżone wyłącznie poprzez modyfikację konstrukcji produktu),
- Dla powyższych, może zaistnieć również sytuacja, w której rozwiązanie techniczne jest znane, ale jego wdrożenie powoduje przekroczenie obowiązującego harmonogramu lub budżetu projektu.

Eskalacja może dotyczyć zarówno nowych wymagań, które dopiero są analizowane i których ocena ryzyka wskazuje na poziom krytyczny, jak i niezgodności, które już wystąpiły, a ich ocena ryzyka (RPN, AP lub Severity) spełnia powyższe kryteria. w obu przypadkach zagadnienie jest przekazywane do Kierownika Działu Rozwoju, który dokonuje oceny zasadności i poprawności eskalacji. Decyzja o formalnym wprowadzeniu problemu (niezgodności) do agendy spotkania projektowego należy więc do kierownika, co pozwala na zachowanie równowagi pomiędzy potrzebą szybkiej reakcji a właściwym priorytetyzowaniem zgłoszeń.



Rysunek 3.7.5.1 Integracja Problem Definition Tool (PDT) w procesie planowania jakości (opracowanie własne)

3.7.6 Charakterystyka formularza Problem Definition Tool

Formularz Problem Definition Tool (PDT) został opracowany w formie ustrukturyzowanego formularza, którego celem jest ujednolichenie sposobu opisu i prezentacji niezgodności podczas spotkań zespołów projektowych. Formularz PDT pełni funkcję narzędzia komunikacyjnego, zapewniającego, że każdy temat analizowany w ramach projektu jest przedstawiany według

tych samych kryteriów i w tym samym układzie. Jego zastosowanie pozwala na to, iż informacje są kompletne, porównywalne i dostępne w przejrzystej formie dla wszystkich uczestników procesu. Pełna struktura formularza wraz z numeracją poszczególnych obszarów została zaprezentowana na rysunku 3.7.6.1.

Cała struktura formularza PDT została podzielona na logiczne sekcje, które odpowiadają kolejnym etapom zbierania danych i analizy niezgodności. Zawiera ona zarówno część poświęconą podstawowym informacjom o temacie i jego charakterystyce, jak i moduły wspierające monitorowanie postępu działań, komunikację pomiędzy zespołową oraz formalne zamykanie sprawy. Szczególne znaczenie mają obszary dotyczące wymagań klienta, konsekwencji niezgodności dla produktu lub procesu, a także definiowania celu, które umożliwiają jednoznaczne określenie oczekiwanego wyniku.

Zaproponowana konstrukcja formularza PDT nie tylko standaryzuje sposób raportowania, lecz także wspiera ciągłość procesu analizy – od zgłoszenia niezgodności, przez jej systematyczne dyskutowanie przez zespół w cyklu tygodniowym, aż po ostateczne zamknięcie i aktualizację dokumentacji jakościowej. Aby osiągnąć ten cel, formularz PDT został podzielony na logiczne obszary, z których każdy pełni określoną funkcję w procesie gromadzenia i prezentowania informacji. Pierwszy obszar (oznaczony jako 1) przedstawiony na rysunku 3.7.6.1 formularza PDT został zaprojektowany w celu systematycznego przedstawienia niezgodności w sposób zwięzły, jednoznaczny i pozbawiony interpretacji, co stanowi punkt wyjścia do dalszej analizy i monitorowania działań.

DEFINICJA NIEZGODNOŚCI: <i>[krótki opis, wyłącznie fakt]</i> 1 CO WIEMY: <i>[krótki opis + uzupełnij table poniżej, wyłącznie fakty]</i>	 <i>[Zdjęcie / szkic / wykres, który ilustruje problem.</i> 3 <i>Materiał wizualny powinien odpowiadać opisowi problemu]</i>	MONITOROWANIE POSTĘPÓW 4 ☐ Zespół zdefiniowany: <i>kto</i> ☐ Inżynier odpowiedzialny za daną technologię jest zaangażowany: <i>kto / kiedy</i> ☐ Temat jasno określony i zrozumiały przez zaangażowany zespół; ☐ Działania natychmiastowe (containment) wdrożone: <i>kto / kiedy / jak</i> ☐ Temat przedstawiony na spotkaniu zespołu: <i>kto / kiedy</i> ☐ Proces "problem solving" uruchomiony: <i>kto / kiedy</i> ☐ DFMEA/PFMEA/Control Plan przeanalizowane i zaktualizowane: <i>kto / kiedy</i> ☐ Lista potencjalnych rozwiązań dostępna; ☐ Permanentne rozwiązanie wdrożone: <i>kto / kiedy / jak</i> ☐ Lessons Learned wdrożone: <i>kto / kiedy / jak</i> ☐ Potwierdzona skuteczność działań: <i>kto / kiedy / jak</i>	PLIKI ROBOCZE <i>[Dokumentacja wspierająca: prezentacje, analizy (FTA, 5Why, Ishikawa, Pugh Matrix). Plan działań wraz z harmonogramem]</i> 5																								
<table border="1"> <tr><td>GDZIE:</td><td></td></tr> <tr><td>KIEDY:</td><td></td></tr> <tr><td>KTO: <i>Kto zgłasza niezgodność?</i></td><td></td></tr> <tr><td>DLACZEGO: <i>Dlaczego to istotne?</i></td><td></td></tr> <tr><td>JAK: <i>Jak zostało odkryte?</i></td><td></td></tr> <tr><td>ILE:</td><td></td></tr> <tr><td>PROJEKTY, KTÓRYCH DOTYCZY NIEZGODNOŚĆ:</td><td></td></tr> </table> 2		GDZIE:		KIEDY:		KTO: <i>Kto zgłasza niezgodność?</i>		DLACZEGO: <i>Dlaczego to istotne?</i>		JAK: <i>Jak zostało odkryte?</i>		ILE:		PROJEKTY, KTÓRYCH DOTYCZY NIEZGODNOŚĆ:		WYMAGANIA KLIENTA: <i>[dotyczące jedynie omawianego tematu]</i> 6	KONSEKWENCJE NIEZGODNOŚCI: <i>[wpływ na produkt/proces]</i>	ZDEFINIOWANY CEL: <i>[zgodny z zasadą SMART]</i>									
GDZIE:																											
KIEDY:																											
KTO: <i>Kto zgłasza niezgodność?</i>																											
DLACZEGO: <i>Dlaczego to istotne?</i>																											
JAK: <i>Jak zostało odkryte?</i>																											
ILE:																											
PROJEKTY, KTÓRYCH DOTYCZY NIEZGODNOŚĆ:																											
7	<table border="1"> <thead> <tr> <th>LISTA OTWARTYCH DZIAŁAŃ</th> <th>OPIS DZIAŁAŃ / REZULTATÓW</th> <th>ODPOWIEDZIALNY</th> <th>TERMIN</th> <th>STATUS %</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td> </td><td> </td><td> </td><td> </td><td> </td></tr> <tr><td> </td><td> </td><td> </td><td> </td><td> </td></tr> <tr><td> </td><td> </td><td> </td><td> </td><td> </td></tr> <tr><td> </td><td> </td><td> </td><td> </td><td> </td></tr> </tbody> </table>	LISTA OTWARTYCH DZIAŁAŃ	OPIS DZIAŁAŃ / REZULTATÓW	ODPOWIEDZIALNY	TERMIN	STATUS %																					
LISTA OTWARTYCH DZIAŁAŃ	OPIS DZIAŁAŃ / REZULTATÓW	ODPOWIEDZIALNY	TERMIN	STATUS %																							

Rysunek 3.7.6.1. Struktura formularza Problem Definition Tool (PDT) (opracowanie własne)

Sekcja „**Definicja niezgodności**” wymaga krótkiego opisu niezgodności opartego wyłącznie na faktach. Eliminacja komentarzy i ocen subiektywnych pozwala ograniczyć ryzyko rozbieżnych interpretacji oraz zapewnia porównywalność zgłaszanych tematów niezależnie od osoby zgłaszającej. Takie podejście wspiera obiektywizację procesu oraz zwiększa przejrzystość komunikacji w zespole.

Uzupełnieniem tej części jest sekcja „**Co wiemy**”, w której informacje są porządkowane według schematu 5W2H (obszar 2 rys. 3.7.6.1.). Struktura ta obejmuje miejsce i czas wystąpienia niezgodności, osobę zgłaszającą, przyczynę wystąpienia problemu, sposób jego wykrycia, skalę zjawiska oraz projekty objęte zakresem zgłaszanej niezgodności. Tak zebrane dane mają charakter kompletny i tworzą wspólną bazę wiedzy dla uczestników spotkania. Zastosowanie tego standardu umożliwia sprawne rozpoznanie kontekstu niezgodności, ogranicza potrzebę dodatkowych wyjaśnień i pozwala na łatwiejsze porównywanie tematów pomiędzy projektami.

Trzecim obszarem jest „**Sekcja wizualna**”, w której umieszczane są zdjęcia, szkice lub wykresy obrazujące daną niezgodność (obszar 3 rys. 3.7.6.1). Materiał wizualny pełni funkcję uzupełniającą wobec opisu i znacząco zwiększa czytelność przekazywanych informacji. Zastosowanie tego elementu sprzyja szybszemu uchwyceniu istoty zagadnienia, wspiera proces analizy oraz minimalizuje ryzyko błędnej interpretacji. Połączenie zwięzłego opisu, usystematyzowanej tabeli zawierającej opis faktów i elementów graficznych pozwala na przedstawienie niezgodności w sposób przejrzysty, spójny i jednoznaczny dla wszystkich członków zespołu projektowego.

Obszar „**Monitorowanie postępów**” (oznaczony jako 4 na rysunku 3.7.6.1) stanowi kluczowy element formularza PDT, którego zadaniem jest systematyczne rejestrowanie działań podjętych w związku z analizą danej niezgodności. Struktura ma formę listy kontrolnej, która prowadzi zespół projektowy przez kolejne etapy – od momentu zdefiniowania zespołu i przypisania odpowiedzialności, poprzez wdrożenie działań natychmiastowych, uruchomienie procesu *Problem Solving* oraz aktualizację dokumentów jakościowych (D-FMEA, P-FMEA, Plan Kontroli), aż po wdrożenie trwałych rozwiązań i ich weryfikację. Uwzględniono także elementy związane z transferem wiedzy (*Lessons Learned*) oraz formalnym potwierdzeniem skuteczności działań. Obszar ten pełni funkcję narzędzia kontrolnego, które zapewnia transparentność procesu analizy, pozwala śledzić status prac i ogranicza ryzyko tzw. przeciągania tematów na kolejne spotkania.

Szczególną rolą tego obszaru jest lista kontrolna, która umożliwia systematyczne monitorowanie przebiegu działań związanych z analizą danej niezgodności. Jej struktura jest spójna z logiką analizy 8D, dzięki czemu każdy temat jest prowadzony według ustandaryzowanego schematu – od momentu zgłoszenia, poprzez kolejne kroki analizy i wdrożenia działań, aż po formalne zamknięcie. Takie rozwiązanie pozwala na zachowanie ciągłości procesu, jednoznaczne śledzenie statusu oraz integrację z innymi narzędziami

planowania jakości. Zestawienie powiązań pomiędzy obszarem „Monitorowanie postępów” a etapami analizy 8D przedstawiono w tabeli 3.7.6.1.

Tabela 3.7.6.1. Powiązanie elementów obszaru 4- ‘Monitorowanie postępów’ formularza PDT z etapami analizy 8D (opracowanie własne)

Element w PDT – Monitorowanie postępów	Powiązanie z etapem analizy 8D	Opis zależności
Zespół zdefiniowany, odpowiedzialności przypisane	D1 Ustanowienie zespołu	Określenie członków zespołu interdyscyplinarnego i ich odpowiedzialności.
Temat jasno określony i zrozumiały	D2 Opis problemu	Ujednolicone i jednoznaczne przedstawienie niezgodności.
Działania natychmiastowe (containment) wdrożone	D3 Wdrożenie działań tymczasowych	Zapobieganie dalszym skutkom niezgodności do czasu wypracowania trwałego rozwiązania.
Proces „Problem Solving” uruchomiony	D4 Identyfikacja przyczyn źródłowych	Formalne rozpoczęcie analizy przyczyn niezgodności.
DFMEA/PFMEA/Plan Kontroli przeanalizowane i zaktualizowane	D5 Określenie działań korygujących	Weryfikacja i aktualizacja dokumentacji jakościowej pod kątem ryzyka.
Lista potencjalnych rozwiązań dostępna	D6 Wdrożenie działań korygujących	Przygotowanie możliwych opcji i wybór najlepszego rozwiązania.
Permanентne rozwiązanie wdrożone	D7 Zapobieganie powtarzalności	Implementacja trwałego działania korygującego i kontrola jego skuteczności.
Lessons Learned wdrożone	D7 Zapobieganie powtarzalności	Transfer wiedzy do kolejnych projektów, aby zapobiec powtórzeniu problemu.
Potwierdzona skuteczność działań	D8 Zakończenie i uznanie zespołu	Formalne zamknięcie tematu, walidacja skuteczności i udokumentowanie efektów.

Obszar formularza PDT „**Pliki robocze**” (oznaczony jako 5 na rysunku 3.7.6.1) pełni funkcję wspierającą, umożliwiając szybki dostęp do dokumentacji potrzebnej podczas spotkań przeglądowych. w tym miejscu zamieszczane są jedynie odnośniki lub wybrane pliki, których otwarcie ułatwia dyskusję nad danym tematem (np. prezentacje, analizy FTA, 5Why, diagram Ishikawy, analiza 8D, macierz Pugh czy plan działań wraz z harmonogramem). Pełne wersje plików roboczych są przechowywane w miejscach dedykowanych dla poszczególnych procesów, zgodnie z obowiązującymi wewnętrznymi procedurami w Tenneco. Takie rozwiązanie pozwala na szybkie uruchomienie niezbędnych materiałów w trakcie spotkania, przy jednoczesnym zachowaniu spójności systemu zarządzania dokumentacją.

Obszar 6 (rys. 3.7.6.1) skupia się na zdefiniowaniu kluczowych informacji, które stanowią kontekst dla analizowanej niezgodności. w pierwszej kolejności określone są wymagania klienta, odnoszące się wyłącznie do danego tematu – ich identyfikacja pozwala na ocenę, czy dana niezgodność bezpośrednio wpływa na spełnienie oczekiwań OEM lub innego interesariusza. Kolejnym elementem jest wskazanie konsekwencji niezgodności w odniesieniu

do produktu i procesu, co umożliwia nadanie priorytetu działaniom oraz właściwe przypisanie zasobów. Całość zamyka zdefiniowany cel, formułowany zgodnie z zasadą SMART (*Specific, Measurable, Achievable, Relevant, Time-bound*). Tak określony cel jest precyzyjny, mierzalny, możliwy do osiągnięcia, powiązany z rzeczywistymi potrzebami projektu oraz osadzony w konkretnym horyzoncie czasowym. Powyższe wpływa na to, iż oczekiwane rezultaty są jednoznaczne i możliwe do obiektywnej oceny podczas kolejnych spotkań.

Obszar 7 (rys. 3.7.6.1) zawiera listę otwartych działań, która stanowi główną część operacyjną formularza PDT. Dla każdego działania przypisywany jest jego opis wraz z oczekiwanym rezultatem, osoba odpowiedzialna, termin wykonania oraz procentowy status zaawansowania. Tabela ta zapewnia przejrzyste rozdzielenie odpowiedzialności, umożliwia śledzenie postępów i pozwala szybko identyfikować ewentualne opóźnienia. Powiązanie listy działań z wcześniejszymi obszarami (wymagania, konsekwencje, cel) zapewnia spójne przejście od identyfikacji niezgodności do jej zamknięcia, wraz z pełnym udokumentowaniem podjętych kroków.

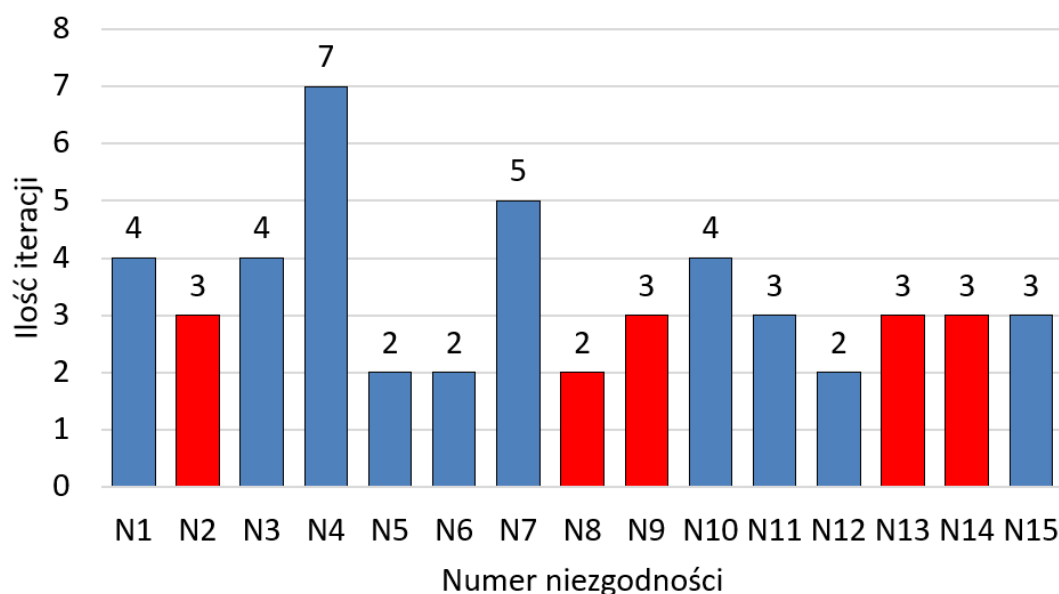
3.7.7 Prezentacja wyników wdrożenia

Wdrożenie instrumentu Problem Definition Tool (PDT) umożliwiło zebranie danych empirycznych, które stały się podstawą do oceny jego praktycznej użyteczności w procesie planowania jakości. Analiza wyników obejmuje zarówno aspekt ilościowy, jak i jakościowy – uwzględniono liczbę iteracji potrzebnych do zamknięcia poszczególnych niezgodności, kompletność wypełnienia formularza w odniesieniu do siedmiu kluczowych obszarów, a także zależność pomiędzy stopniem wykorzystania formularza PDT a wartością wskaźnika ryzyka RPN z analizy FMEA. Prezentowane dane pozwalają ocenić, w jakim stopniu narzędzie spełnia swoją funkcję standaryzacji opisu i prezentacji zagadnień projektowych, a także w jakich obszarach jego stosowanie napotykało ograniczenia.

Badania prowadzono w okresie od czerwca 2022 do lutego 2024 roku i obejmowały analizę liczby iteracji potrzebnych do zamknięcia 15 niezgodności od N1 do N15 (każda niezgodność to osobny formularz PDT). Na wykresie (rys. 3.7.7.1) widoczna jest duża zmienność – od dwóch iteracji (N5, N6, N8, N12) do siedmiu (N4) związanych z analizowanymi niezgodnościami. Najczęściej liczba iteracji mieściła się w przedziale od dwóch do czterech.

Czerwone słupki oznaczają niezgodności, które „powróciły” w okresie krótszym niż 2 lata do powtórnej analizy. Do tej grupy należą niezgodności N2, N8, N10, N12, N13 oraz N14. w każdym z tych przypadków liczba iteracji wyniosła od dwóch do trzech.

Pozostałe niezgodności, przedstawione w kolorze niebieskim, zostały one zamknięte w badanym okresie bez ponownego pojawienia się (zgłoszenia). w tej grupie odnotowano większe zróżnicowanie – od dwóch iteracji (N5, N6) do siedmiu (N4). Najwyższą liczbę iteracji zarejestrowano dla niezgodności N4 (7), a kolejne wartości wysokie to N7 (5) oraz N1 i N3 (po 4).



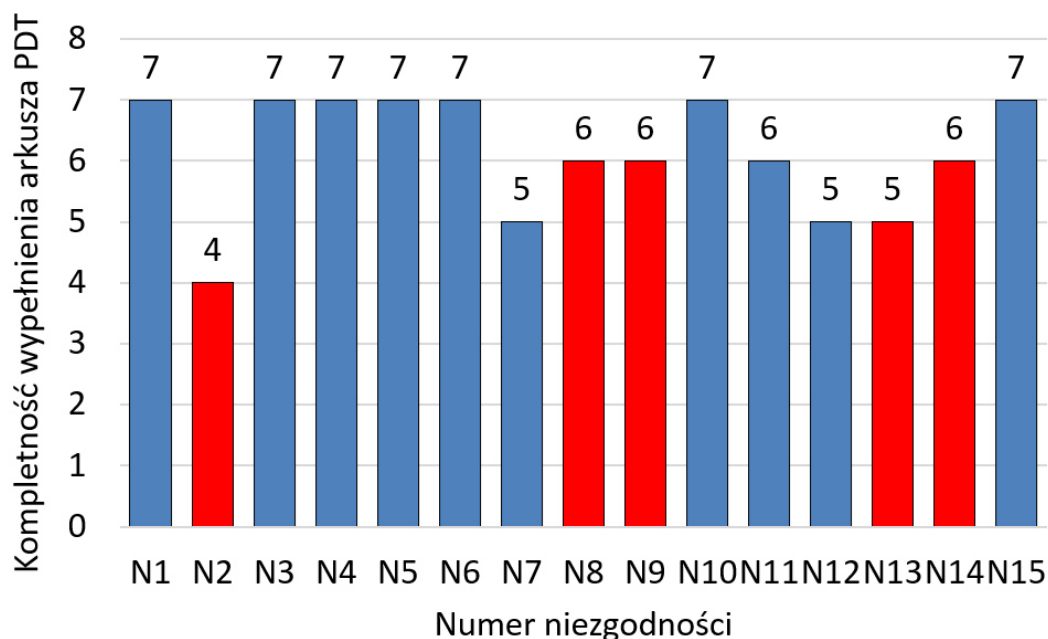
Rysunek 3.7.7.1. Ilość przeprowadzonych iteracji od zaistnienia niezgodności do spotkania zamykającego (opracowanie własne)

Wykres (rys. 3.7.7.2) przedstawia ocenę kompletności wypełnienia formularza PDT w skali od 0 do 7 punktów, gdzie każdy punkt odpowiada jednemu z obszarów oznaczonych na formularzu PDT (rys. 3.7.6.1). Analiza obejmuje 15 formularzy PDT dotyczących niezgodności od N1 do N15 i wskazuje na zróżnicowany poziom kompletności dokumentowania.

Najwyższą ocenę, równą 7 punktom, uzyskały niezgodności N1, N3, N4, N5, N6, N10 oraz N15. Oznacza to, że wszystkie obszary formularza PDT zostały w pełni wypełnione. Taka kompletność wypełnienia formularza PDT wskazuje na najwyższy poziom dyscypliny w dokumentowaniu niezgodności i zapewnia pełną przejrzystość zgłoszenia ułatwiając proces prezentacji i analizy danych.

W grupie średnich wyników, od 5 do 6 punktów, znalazły się m.in. niezgodności N7 (5), N8 (6), N9 (6), N11 (6), N12 (5), N13 (5), N14 (6). w tych przypadkach niektóre obszary formularza PDT pozostawały częściowo niewypełnione – najczęściej brakowało zapisów dotyczących materiału wizualnego (obszar 3) lub szczegółowych danych w sekcji wymagań i konsekwencji (obszar 6). Pomimo to, zgłoszenia zawierały większość informacji koniecznych do dalszej pracy zespołu projektowego.

Najniższe wartości, 4 punkty, odnotowano dla niezgodności N2. w tym przypadku wypełniono mniej niż 2/3 wymaganych obszarów formularza PDT, co oznacza, że brakowało zarówno danych kontekstowych, jak i szczegółowych informacji wymaganych dla oceny statusu zagadnienia. Braki te mogły utrudniać sprawne prowadzenie analizy podczas spotkań projektowych.



Rysunek 3.7.7.2. Kompletność wypełnienia formularza PDT, punktacja od 0-7 (opracowanie własne)

Tabela 3.7.7.1 przedstawia wyniki analizy dla 15 niezgodności od N1 do N15 (każda niezgodność analizowana na osobnym formularzu PDT) ich status w zakresie trwałego rozwiązania (TAK/NIE) oraz wskazuje braki w poszczególnych obszarach formularza PDT (1–7). Dzięki temu możliwe jest ocena kompletności wypełniania formularza oraz powiązanie jej z rezultatem działań podjętych w ramach danego zgłoszenia niezgodności.

W grupie trwale rozwiązanych niezgodności (TAK) znalazło się 10 niezgodności: N1, N3, N4, N5, N6, N7, N10, N11, N12 oraz N15. Wśród nich sześć niezgodności (N1, N4, N5, N6, N10 i N11) zostało udokumentowanych w sposób kompletny, bez braków w żadnym z obszarów formularza. Pozostałe przypadki, pomimo że zakończone trwale, zawierały niepełne uzupełnienie wybranych pól.

W formularzu wystąpiły następujące braki:

- N2 – brak w obszarach 3, 4 i 5,
- N7 – brak w obszarach 3 i 5,
- N8 – brak w obszarze 5,
- N9 – brak w obszarze 5,
- N11 – brak w obszarze 6,
- N12 – braki w obszarach 5 i 6,
- N13 – brak w obszarach 5 i 6,
- N14 – brak w obszarach 5.

Dla części niezgodności nawet brak kilku kluczowych informacji nie przeszkodził w trwałym zamknięciu sprawy. Najczęściej pomijanym elementem był obszar 5 (pliki robocze), a w dalszej kolejności obszary 6 (wymagania, konsekwencje, cel) i 3 (część wizualna).

Tabela 3.7.7.1. Braki w uzupełnieniu poszczególnych obszarów formularza PDT, w odniesieniu do rys. 3.7.6.1

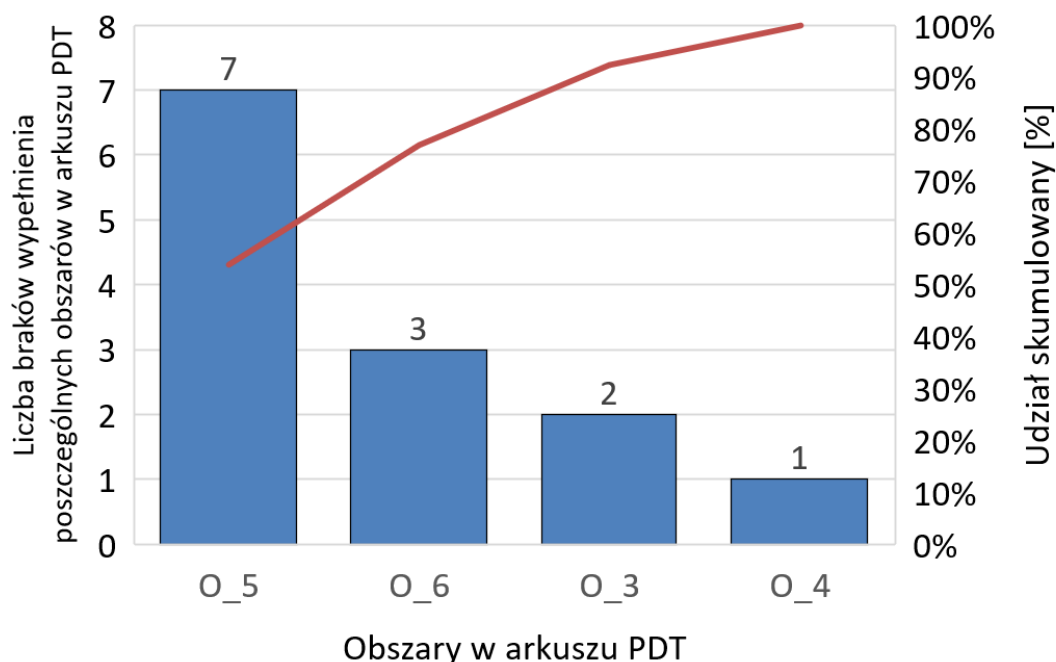
NIEZGODNOŚĆ	NIEZGODNOŚĆ TRWALE USUNIĘTA* [TAK/NIE]	BRAKI W ARKUSZU PDT (numer obszaru)						
		1	2	3	4	5	6	7
N1	TAK							
N2	NIE			X	X	X		
N3	TAK							
N4	TAK							
N5	TAK							
N6	TAK							
N7	TAK			X		X		
N8	NIE					X		
N9	NIE					X		
N10	TAK							
N11	TAK						X	
N12	TAK					X	X	
N13	NIE					X	X	
N14	NIE					X		
N15	TAK							

* Niezgodność nie powtarzająca się w przeciągu 2 lat.

Rysunek 3.7.7.4 przedstawia wykres Pareto liczby braków wypełnienia w poszczególnych obszarach formularza PDT, zidentyfikowanych na podstawie analizy 15 niezgodności od N1 do N15 (każda analizowana na osobnym formularzu). Na wykresie zaprezentowano wyłącznie te obszary, w których odnotowano braki – obszary 1 („Definicja niezgodności”), 2 („Co wiemy”) oraz 7 („Lista działań”) zostały pominięte, ponieważ były uzupełniane w każdym przypadku.

Największą liczbę braków stwierdzono w obszarze 5 („Pliki robocze”) – 7 przypadków, co odpowiada 58% wszystkich braków. Kolejne miejsca zajmują obszar 6 („Wymagania klienta, konsekwencje, cel”) – 3 przypadki (25%) oraz obszar 3 („Część wizualna – zdjęcie, szkic, wykres”) – 2 przypadki (17%). Najmniej braków odnotowano w obszarze 4 („Monitorowanie postępów”) – 1 przypadek (8%).

Podsumowując, wszystkie stwierdzone braki koncentrują się w czterech obszarach: 3, 4, 5 i 6. Największe znaczenie ma obszar 5, którego udział jest dominujący, a w połączeniu z obszarami 6 i 3 odpowiada on za blisko 100% braków w analizowanym zbiorze.



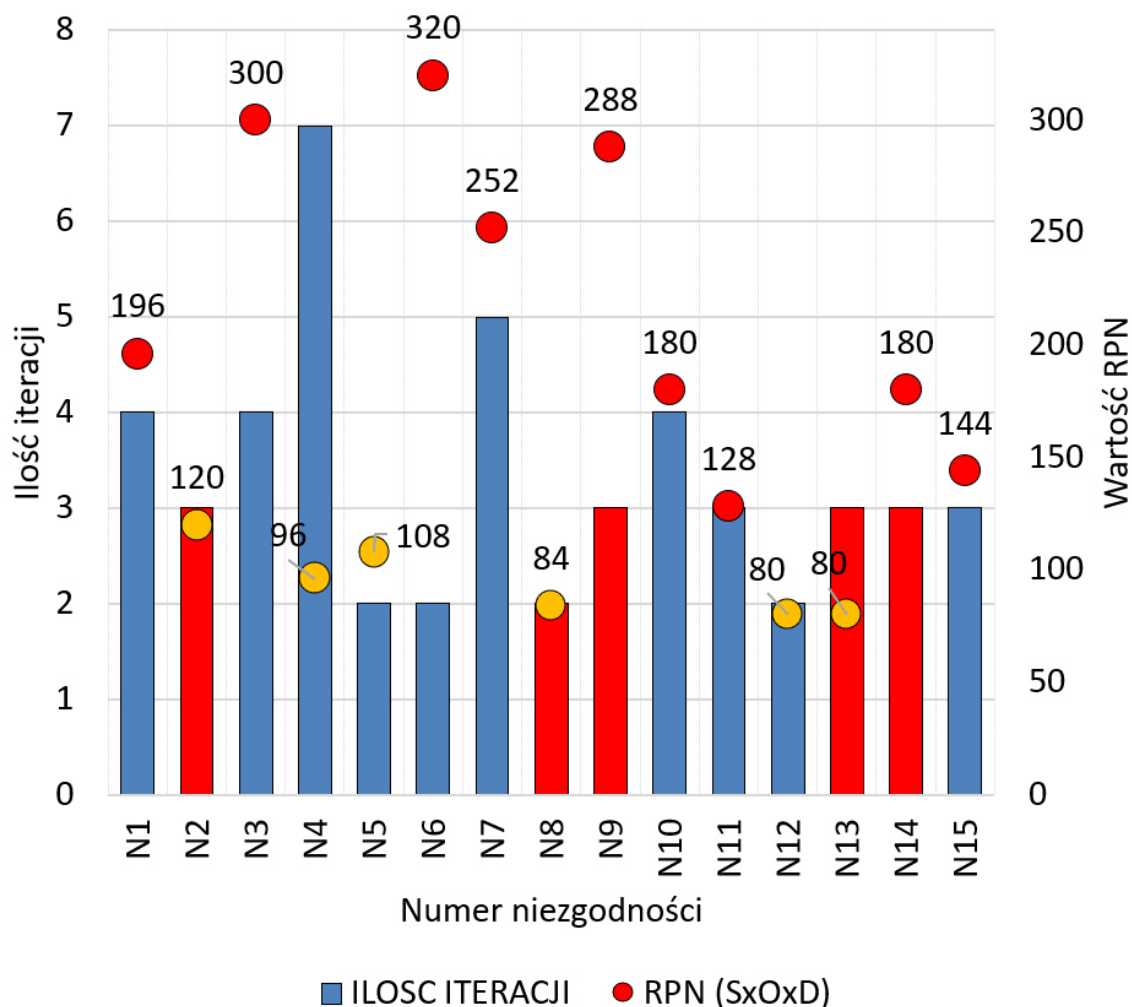
Rysunek 3.7.7.3. Liczba braków wypełnienia dla poszczególnych obszarów w formularzu PDT (opracowanie własne)

Rysunek 3.7.7.4 przedstawia zestawienie liczby iteracji formularza PDT (słupki niebieskie) z wartościami wskaźnika RPN wynikającymi z analizy FMEA (oznaczenia punktowe). Czerwonym kolorem wyróżniono niezgodności, które wystąpiły ponownie w okresie krótszym niż 24 miesiące.

Wartości RPN mieszczą się w przedziale od 80 (N12, N13) do 320 (N6). Wysokie poziomy ryzyka powyżej 250 odnotowano dla N3 (300), N6 (320), N7 (252) oraz N9 (288). Graniczna wartość 120 punktów, uznawana za próg wymagający działań redukujących, została przekroczona w 10 przypadkach.

Liczba iteracji waha się od 2 (N5, N6, N8, N12) do 7 (N4). Najczęściej pojawiają się wartości od 3 do 4, co oznacza, że większość zgłoszeń była analizowana kilkakrotnie przed ich formalnym zamknięciem.

Zestawienie wskazuje, że w części przypadków wysokie wartości RPN wiązały się z większą liczbą iteracji, jak w przypadku N7 (RPN = 252, 5 iteracji), natomiast w innych przypadkach zależność ta nie występowała, czego przykładem jest N6 (RPN = 320, 2 iteracje). Niezgodności o niskim RPN (80–108) mogły być analizowane z podobną intensywnością, jak te o wysokim ryzyku, np. N4 (RPN = 96, 7 iteracji).



Rysunek 3.7.7.4. Liczba iteracji wykorzystania formularza PDT dla danej niezgodności vs jej RPN (opracowanie własne)

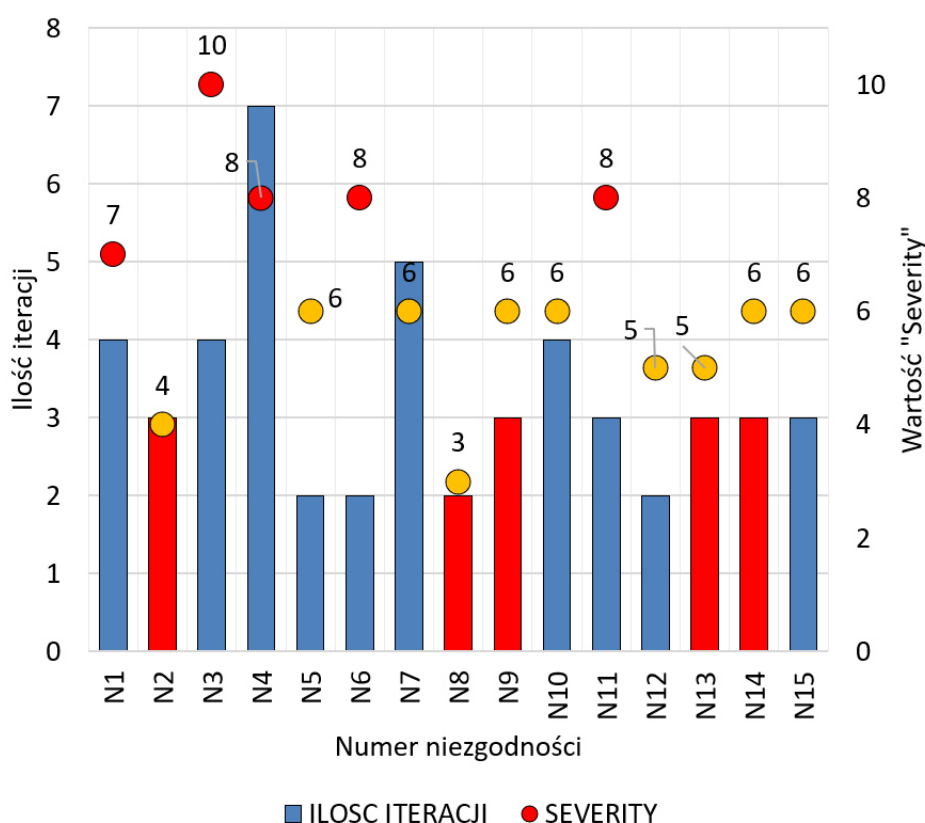
Rysunek 3.7.7.5 przedstawia zestawienie liczby iteracji przeprowadzonych z użyciem formularza PDT dla poszczególnych niezgodności od N1 do N15 (każda niezgodność analizowana na osobnym formularzu PDT) oraz odpowiadających im wartości *Severity* wynikającej z analizy FMEA. Czerwone słupki wskazują niezgodności, które pojawiły się ponownie w okresie do dwóch lat od ich potencjalnego usunięcia. Wartości *Severity* zaznaczono punktami – przy czym poziomy powyżej 6 są traktowane jako krytyczne, ponieważ mają bezpośredni wpływ na główną funkcję produktu.

Liczba iteracji mieści się w przedziale od 2 do 7. Najwięcej powrotów odnotowano w przypadku N4 (7 iteracji, *Severity* = 8) oraz N7 (5 iteracji, *Severity* = 6). Kolejne niezgodności o podwyższonej liczbie iteracji to N1 (4 iteracje, *Severity* = 7), N3 (4 iteracje, *Severity* = 10) oraz N10 (4 iteracje, *Severity* = 6).

Niezgodności o mniejszej liczbie iteracji to m.in. N5 i N6 (2 iteracje, Severity = 6 i 8) oraz N12 (2 iteracje, Severity = 5). Najniższą wartość Severity odnotowano dla N8 (Severity = 3, 2 iteracje).

Szczególne miejsce zajmuje niezgodność N3, które osiągnęło maksymalny poziom Severity = 10 przy liczbie iteracji (4). z kolei niezgodności takie jak N2 (Severity = 4, 3 iteracje) i N14 (Severity = 6, 3 iteracje).

Zestawienie (rys. 3.7.7.6) pokazuje, że niezgodności różnią się zarówno pod względem czasu trwania analiz na co wskazują w iteracje , jak i oceny istotności skutków. Wysoka wartość Severity nie zawsze była związana z dużą liczbą iteracji, natomiast część zgłoszeń o umiarkowanych ocenach wymagała kilkukrotnego powrotu do analizy.



Rysunek 3.7.7.5. Liczba iteracji wykorzystania formularza PDT dla danej niezgodności vs jej Severity (opracowanie własne)

Tabela 3.7.7.2 przedstawia analizę przyczyn braków w wypełnianiu formularza PDT dla wybranych niezgodności. W zestawieniu wskazano nie tylko, w których obszarach formularza PDT wystąpiły braki, ale również jakie były ich potencjalne powody. Najczęściej pojawiały się trudności związane z przygotowaniem danych w krótkim czasie – przykładem są obszary, w których brakowało gotowych analiz (FTA, 5Why, Ishikawa, analiza 8D), ponieważ znajdowały się one jeszcze w opracowaniu w momencie organizacji spotkania. w innych przypadkach powodem była niejednoznaczna odpowiedzialność za aktualizację i tzw. podpinanie dokumentów, co skutkowało pominięciem sekcji „Pliki robocze”. w części niezgodności

brakowało również materiałów wizualnych (zdjęć, szkiców, wykresów), które miały ułatwiać zrozumienie problemu, ale ich przygotowanie wymagało dodatkowego czasu lub współpracy z innymi działami. z kolei w obszarze „Monitorowanie postępów” odnotowano brak konsekwentnych przeglądów i systematycznego korzystania z listy kontrolnej, co ograniczało możliwość pełnego raportowania stanu działań.

Tabela 3.7.7.2. Identyfikacja przyczyn źródłowych braków w uzupełnianiu obszarów formularza PDT (Rysunek 3.7.6.1) dla poszczególnych niezgodności (opracowanie własne)

N2	
O_3	brak dostępnych materiałów wizualnych w momencie spotkania
O_4	brak regularnych przeglądów postępów między spotkaniami zespołów
O_5	brak gotowych analiz w momencie omawiania tematu (FTA, 5Why, Ishikawa, 8D)
N7	
O_3	brak dostępnych materiałów wizualnych w momencie spotkania
O_5	brak gotowych analiz w momencie omawiania tematu (FTA, 5Why, Ishikawa, 8D)
N8	
O_5	brak otwartego "Problem Solvingu" dla niezgodności
N9	
O_5	brak gotowych analiz w momencie omawiania tematu (FTA, 5Why, Ishikawa, 8D)
N11	
O_6	niepełna interpretacja lub brak dostępu do wymagań klienta
N12	
O_5	brak jednoznacznej odpowiedzialności za podpinanie dokumentów i uzupełnienie formularza PDT
O_6	brak świadomości wpływu zagadnienia na główną funkcję produktu
N13	
O_5	traktowanie obszaru jako opcjonalnego
O_6	rozbieżności w komunikacji między działami co do wymagań
N14	
O_5	traktowanie danego obszaru w formularzu PDT jako opcjonalnego

Podsumowując, przeprowadzona analiza wskazuje, że braki w wypełnianiu formularza PDT są najczęściej efektem połączenia kilku czynników: organizacyjnych (np. brak przypisania odpowiedzialności, różne praktyki pracy w zespołach), procesowych (brak danych wejściowych w odpowiednim czasie, analizy w trakcie opracowania) oraz komunikacyjnych (rozbieżności w interpretacji wymagań klienta, brak jednoznacznych informacji między działami). Ważnym wnioskiem jest to, że jakość i kompletność formularzy w dużej mierze zależą od zespołu, który je uzupełnia. Zespoły z większym doświadczeniem i lepiej zorganizowanymi procesami zazwyczaj dbają o pełne uzupełnianie wszystkich pól, natomiast w zespołach mniej doświadczonych częściej zdarzają się uproszczenia lub pomijanie danych. Widać też wyraźnie, że niektóre obszary, takie jak definicja niezgodności czy podstawowe dane kontekstowe, są zawsze uzupełniane, ponieważ uznaje się je za kluczowe, podczas gdy pola wspierające (np. dokumentacja dodatkowa czy wymagania klienta) bywają traktowane jako drugorzędne.

3.7.8 Wprowadzenie do instrumentu Technical Review

Technical Review zostało pierwotnie opracowane i wdrożone na potrzeby rozwoju amortyzatorów konwencjonalnych. w tym zakresie instrument spełniał swoją funkcję, zapewniając uporządkowaną ocenę danych technicznych, potwierdzenie zgodności projektu z wymaganiami klienta oraz weryfikację wykonalności konstrukcji w kontekście dostępnych procesów produkcyjnych. Dzięki temu umożliwiał skuteczną identyfikację ryzyk i ograniczenie liczby niezgodności ujawniających się dopiero w fazach prototypowych czy walidacyjnych. Próba zastosowania tego samego podejścia do amortyzatorów sterowanych elektronicznie ujawniła jednak istotne ograniczenia narzędzia. Produkty mechatroniczne różnią się znacząco od rozwiązań konwencjonalnych – wykorzystują odmienne materiały, wymagają innych technologii wytwarzania i procesów montażowych. Wiele kluczowych aspektów ich funkcjonowania staje się widocznych dopiero na poziomie produktu końcowego, czyli w pojeździe, gdzie amortyzator współpracuje z systemami sterowania, elektroniką i pozostałymi elementami podwozia. w takich warunkach klasyczna wersja Technical Review okazała się niewystarczająca, ponieważ nie obejmowała pełnej oceny specyfiki nowych technologii ani obszarów ryzyka istotnych dla złożonych systemów.

Na tym tle warto podkreślić różnicę wobec Design Review, które w strukturze APQP poprzedza Technical Review i stanowi wejście do tego procesu. Design Review koncentruje się wyłącznie na sprawdzeniu poprawności i spójności dokumentacji projektowej – rysunków, modeli CAD, zestawień materiałowych – bez zagłębiania się w szczegółową ocenę aspektów technicznych i procesowych. Technical Review pełni więc szerszą funkcję, pozwalając na analizę kompletności projektu i potwierdzenie gotowości do dalszych etapów rozwoju.

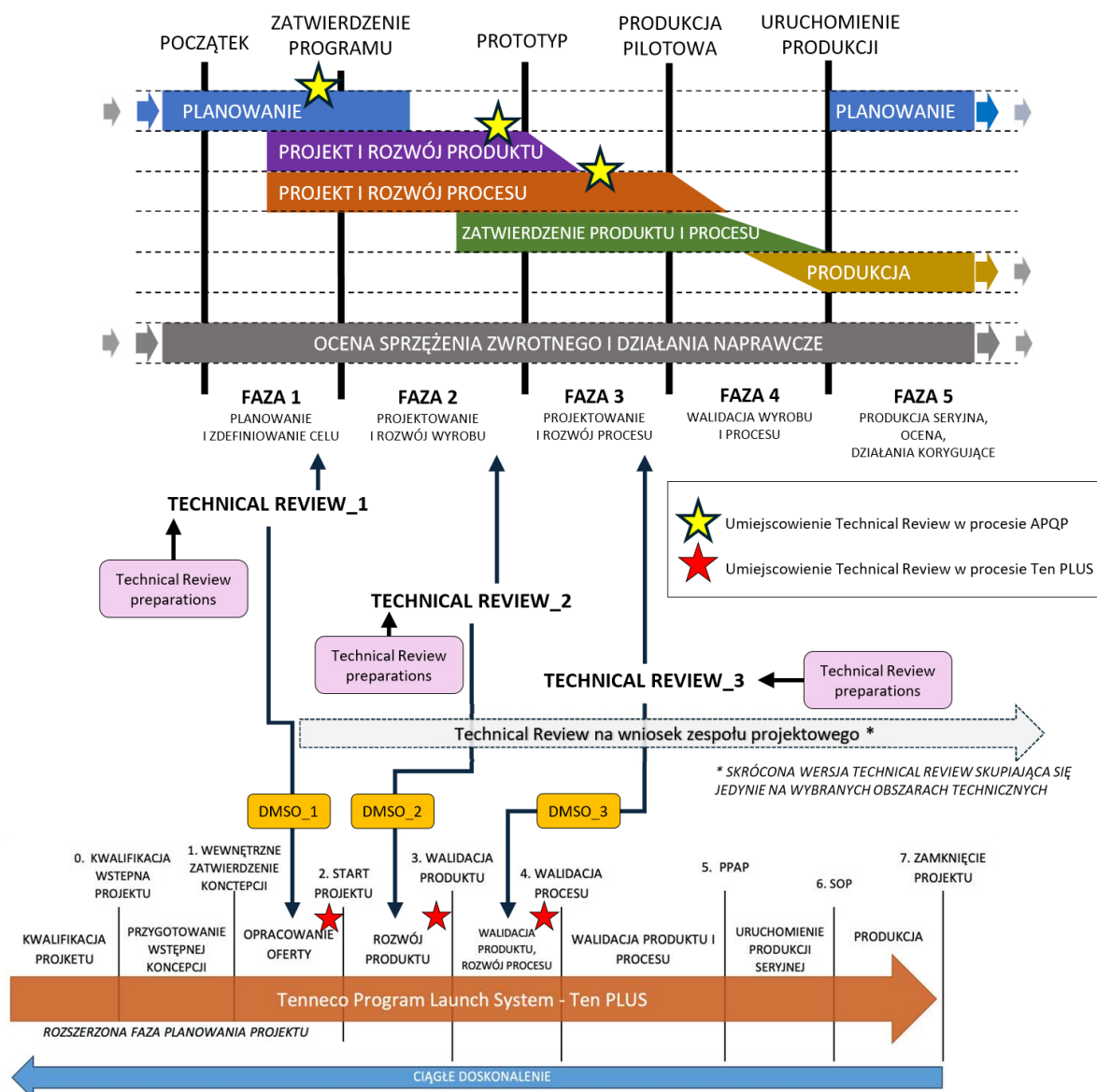
Narzędzie Technical Review ma postać ustandaryzowanego arkusza, który pełni rolę listy kontrolnej. Każdy obszar oceny posiada przypisany temat, wyszczególnione wymagania, pytania pomocnicze ułatwiające identyfikację ryzyka oraz pola umożliwiające określenie statusu i zaplanowanie działań korygujących. Taka struktura nadaje narzędziu przejrzystość i zapewnia jednolitość oceny projektów, a jednocześnie pozwala na systematyczne monitorowanie postępu i skuteczności wdrażanych działań.

Doświadczenia zdobyte przy próbach zastosowania Technical Review do amortyzatorów elektronicznie sterowanych pokazały wyraźnie, że instrument w swojej pierwotnej formie musi zostać istotnie rozszerzony i dostosowany. Tylko w ten sposób możliwe jest uchwycenie specyfiki produktów różniących się od klasycznych rozwiązań nie tylko konstrukcją, ale również materiałami, procesem wytwarzania i zakresem wymagań pojawiających się dopiero na etapie gotowego pojazdu.

Technical Review znajduje również mocne uzasadnienie w kontekście normatywnym. Wymagania ISO 9001:2015 oraz IATF 16949:2016 jednoznacznie podkreślają konieczność prowadzenia zaplanowanych i udokumentowanych przeglądów projektowych oraz procesowych, które mają zapewnić zgodność wyrobu i procesu z wymaganiami klienta oraz zdolnościami organizacji. w tym ujęciu Technical Review stanowi praktyczne narzędzie

realizacji tych wymagań, pozwalając na systematyczną identyfikację ryzyk i wczesne podejmowanie działań korygujących.

W strukturze APQP i systemu Ten PLUS Technical Review został umiejscowiony jako formalna bramka jakościowa wspierająca przejście pomiędzy kolejnymi fazami rozwoju. Realizowany jest kilkakrotnie – od wczesnych etapów planowania i rozwoju produktu, przez walidację procesu, aż po przygotowanie produkcji seryjnej – co umożliwia stopniowe potwierdzanie dojrzałości projektu. Pełni on jednocześnie rolę jednego z kluczowych wejść do procesu Design & Manufacturing Sign-Off (DMSO), który stanowi formalne zatwierdzenie gotowości projektu do przejścia do następnej fazy. DMSO obejmuje weryfikację aspektów technicznych, harmonogramowych, kosztowych, jakościowych, zakupowych oraz produkcyjnych, a dane dostarczane w ramach Technical Review stanowią podstawę do podjęcia decyzji o dalszym przebiegu projektu i ograniczają ryzyko późnych, kosztownych zmian. Schemat zależności oraz umiejscowienia Technical Review w procesie APQP i Ten PLUS przedstawiono na rysunku 3.7.8.1, który ilustruje rozmieszczenie kolejnych przeglądów (TR_1, TR_2, TR_3) w harmonogramie projektu, ich powiązanie z fazami rozwoju oraz rolę w przygotowaniu do decyzji DMSO.



Rysunek 3.7.8.1. Umieszczenie Technical Review w procesie planowania jakości produktu i procesie wg APQP oraz Ten PLUS

3.7.9 Charakterystyka instrumentu Technical Review

Technical Review jako instrument planowania jakości ma charakter zdefiniowanego i ustandaryzowanego procesu, którego podstawą jest arkusz kontrolny. Narzędzie to łączy cechy klasycznej listy kontrolnej z elementami raportu statusowego, umożliwiając systematyczną ocenę projektu w zdefiniowanych obszarach technicznych i procesowych. Każdy temat w arkuszu został przypisany do jednego z kluczowych wymagań jakościowych, a jego struktura gwarantuje jednolity sposób prowadzenia oceny niezależnie od rodzaju produktu czy specyfiki programu. Dzięki temu Technical Review pełni funkcję standardu

organizacyjnego, zapewniając porównywalność wyników oraz spójność dokumentacji pomiędzy projektami.

Arkusz Technical Review (TR) został zaprojektowany w sposób przejrzysty i intuicyjny. Składa się z nagłówka identyfikującego projekt, w którym wskazuje się m.in. numer programu, nazwę projektu, fazę Ten PLUS oraz osoby odpowiedzialne za przygotowanie przeglądu. Główna część arkusza obejmuje listę tematów poddawanych ocenie, zestaw wymagań i pytań pomocniczych, a także sekcję do wskazania statusu i zaplanowanych działań. Tak zbudowana struktura sprawia, że przegląd nie ogranicza się do ogólnej dyskusji, lecz prowadzi uczestników krok po kroku przez krytyczne obszary projektu, ułatwiając identyfikację ryzyk, luk oraz decyzji wymagających podjęcia działań korygujących.

Charakterystycznym elementem narzędzia jest zastosowanie systemu statusów kolorystycznych, który umożliwia jednoznaczną i wizualnie czytelną klasyfikację wyników oceny. Status RED oznacza brak działań korygujących i ryzyko niekontrolowane, YELLOW wskazuje na ryzyko zidentyfikowane i działania w toku, GREEN potwierdza wdrożenie skutecznych działań i monitoring przez zespół projektowy, COMPLETED oznacza temat zamknięty, a N/A – brak odniesienia do danego projektu lub konstrukcji. Zastosowanie takiego systemu pozwala na szybkie zrozumienie stanu projektu przez osoby zarządzające oraz stanowi efektywne narzędzie raportowania.

Ważnym elementem arkusza TR są również pola umożliwiające przypisanie odpowiedzialności, określenie terminu realizacji działań oraz monitorowanie ich statusu. Dzięki temu Technical Review nie pełni wyłącznie funkcji oceny, ale staje się integralną częścią systemu zarządzania projektem. Dokumentowanie ustaleń i działań w jednym miejscu zwiększa przejrzystość procesu, a także pozwala na skuteczne monitorowanie postępu i szybką reakcję w przypadku odchyleń.

Na rysunku 3.7.9.1 przedstawiono arkusz Technical Review wraz z opisem poszczególnych sekcji. Grafika ilustruje logiczny układ narzędzia – od nagłówka identyfikacyjnego, poprzez część poświęconą ocenie tematów technicznych, aż po sekcję dedykowaną planowaniu i monitorowaniu działań. Dzięki takiej strukturze możliwe jest uchwycenie zarówno wymagań wejściowych projektu, jak i wynikających z nich decyzji niezbędnych do zapewnienia zgodności konstrukcji i procesu z oczekiwaniami klienta oraz standardami wewnętrznymi.

MIS Technical Review_ <i>nazwa projektu_data przeglądu</i>									
SOP klienta (Start of Production)					ZATWIERDZAJĄCY				
Faza Ten PLUS					Dyrektor ds. inżynierii:				
Numer projektu					Kierownik działu rozwoju produktu:				
Nazwa projektu					Ekspert ds. linii produktowej				
Inżynier produktu					Główny inżynier dla dane klienta OEM				
Inżynier ds. modułu									
Inżynier CAD									
					data: _____				
#	Temat	Wymagania	Pytania pomocnicze	Status	Faza projektu wg Ten PLUS	Plan działań	Termin realizacji	Osoba odpowiedzialna	Status działań
1	Specyfikacja wymagań klienta (SOR Assessment)								
2	Analiza porównawcza (benchmarking)								
3	Ocena ryzyka ofertowania (RFQ Risk Assessment)								
4	Analiza ryzyka projektowego (DFMEA)								
5	Weryfikacja zgodności ze standardami Tenneco								
6	Identyfikacja cech specjalnych/krytycznych (SC/CC Matrix)								
7	Analiza dojrzałości i innowacyjności technologii								
8	Ocena komponentów przeniesionych (carry-over)								
9	Weryfikacja listy materiałowej (BOM)								
10	Ocena wymiarowania i tolerancji geometrycznych (GD&T)								
11	Analiza tolerancji i łańcuchów wymiarowych								
12	Plan i wyniki walidacji (DVP&R)								
13	Weryfikacja zgłoszeń patentowych								
14	Ocena ryzyka własności intelektualnej (Freedom to Operate)								
15	Plan kontroli dla fazy DV (prototyp)								
16	Rekomendacje i Lessons Learned								

Wyszczególnienie kluczowych wymagań technicznych, jakościowych lub funkcjonalnych stawianych analizowanemu obszarowi.

Aktualny stan danego tematu – informacja o zakresie realizacji, rodzaju ryzyka lub statusie niezgodności.

Zestaw pytań ułatwiających identyfikację ryzyka, luk oraz sposobu spełnienia wymagań.

Skrótowe określenie zagadnienia podlegającego analizie

Opis zaplanowanych działań korygujących, prewencyjnych lub usprawniających powiązanych z danym tematem.

Oczekiwany lub ustalony termin zakończenia wskazanych działań projektowych.

Imię/nazwisko lub funkcja osoby odpowiedzialnej za realizację działań i zamknięcie tematu.

Informacja o aktualnym przebiegu realizacji działań: otwarte, w toku, zakończone lub nieaktualne.

Faza planowania jakości (wg Ten PLUS) w jakiej znajduje się projekt podczas przeglądu Technical Review

Dostępne fazy planowania jakości wg Ten PLUS (rozwijane menu):
 PLANOWANIE PROJEKTU
 ROZWÓJ PRODUKTU
 WALIDACJA PRODUKTU I ROZWÓJ PROCESU
 ZMIANA WYMAGAŃ DLA PROJEKTU
 PRE-PRODUKCJA

Dostępne statuty (rozwijane menu):
 RED – brak wdrożonych działań zaradczych; ryzyko niekontrolowane, o średnim lub wysokim poziomie;
 YELLOW – ryzyko zidentyfikowane; działania korygujące zaplanowane i wdrażane (status: otwarte, w procesie);
 GREEN – ryzyko zidentyfikowane; wdrożone środki kontroli oraz stały monitoring przez zespół projektowy;
 COMPLETED – wszystkie działania wdrożone; ryzyko wyeliminowane, temat zamknięty;
 N/A – nie dotyczy danego produktu lub zakresu konstrukcji; brak powiązania z projektem

Rysunek 3.7.9.1. Struktura arkusza Technical Review wraz z opisem poszczególnych sekcji (opracowanie własne)

W przypadku Technical Review stosowanego dla amortyzatorów konwencjonalnych oraz produktów mechatronicznych podstawowa struktura narzędzia pozostaje taka sama. Lista tematów podlegających ocenie, jak również ich opisy w arkuszu, odnoszą się do identycznych obszarów – począwszy od specyfikacji wymagań klienta, poprzez analizę ryzyka projektowego, aż po plan walidacji i Lessons Learned. Wynika to z faktu, że główna funkcja amortyzatora, czyli tłumienie drgań i zapewnienie kontaktu koła z nawierzchnią, jest wspólna dla obu typów produktów. Różnice pojawiają się dopiero w zakresie funkcji pomocniczych oraz w rozszerzonym zakresie funkcji głównej w przypadku rozwiązań mechatronicznych, które integrują elementy elektroniczne i dodatkowe elementy wchodzące w skład systemu.

W tym obszarze wprowadzono autorskie rozwiązanie polegające na opracowaniu pytań pomocniczych dostosowanych do specyfiki danej technologii. O ile tematy główne w arkuszu Technical Review pozostają niezmiennie, o tyle szczegółowe pytania zostały zróżnicowane w taki sposób, aby precyzyjnie odzwierciedlały ryzyka charakterystyczne dla amortyzatorów konwencjonalnych i mechatronicznych. Takie podejście pozwala zachować spójność oceny w odniesieniu do kluczowych obszarów projektowych i procesowych, a jednocześnie umożliwia ich bezpośrednie powiązanie z wymaganiami normatywnymi, standardami wewnętrznymi Tenneco oraz oczekiwaniami klienta.

W tabeli 3.7.9.1 przedstawiono pełną listę szesnastu tematów, które stanowią podstawę do przeprowadzenia Technical Review. Każdy z tematów zostanie szczegółowo opisany w kolejnych podrozdziałach, z uwzględnieniem jego celu, sposobu oceny oraz oczekiwanych rezultatów.

Tabela 3.7.9.1. Tematy podlegające ocenie w ramach Technical Review (opracowanie własne)

Temat	Opis szczegółowy
Specyfikacja wymagań klienta (SOR Assessment)	Faza Planowania projektu: należy potwierdzić otrzymanie pełnej specyfikacji klienta (SOR). Jeśli są wymagania niemożliwe do spełnienia, trzeba je wskazać i zaproponować działania korygujące. Odstępstwa muszą być uwzględnione w ofercie dla klienta. Pozostałe fazy: Należy wskazać zmiany od fazy planowania projektu i ponownie określić wymagania trudne do realizacji oraz plan działań.
Analiza porównawcza (benchmarking)	Zgromadzenie danych porównawczych dotyczących produktów konkurencji i rozwiązań referencyjnych (również rozwiązań z własnego portfolio). Analiza obejmuje aspekty konstrukcyjne i produkcyjne.
Ocena ryzyka ofertowania (RFQ Risk Assessment)	Analiza potencjalnych ryzyk technicznych i projektowych wykonywana w fazie planowania projektu. Każde ryzyko musi być opisane, przypisane do właściciela i mieć zdefiniowany plan minimalizacji.
Analiza ryzyka projektowego (DFMEA)	Opracowanie DFMEA zgodnie z AIAG v4 lub AIAG & VDA. Należy uwzględnić wymagania prawne/regulacyjne. Ryzyka wysokiego poziomu (RPN/AP) muszą być wskazane, zredukowane poprzez działania lub oficjalnie zaakceptowane przez organizację.
Weryfikacja zgodności ze standardami Tenneco	Projekt powinien być zgodny ze standardami Tenneco. Wszystkie odstępstwa muszą być wskazane, uzasadnione i musi być zaproponowany plan działań (zmiana projektu lub specyfikacji).
Identyfikacja cech specjalnych/krytycznych (SC/CC Matrix)	Wszystkie cechy specjalne i krytyczne muszą być zidentyfikowane, uzgodnione z klientem i wpisane do matrycy SC/CC. Powinny być powiązane z DFMEA i planem kontroli. Należy pokazać zmiany między fazami planowania jakości projektu- jeśli takie były.
Analiza dojrzałości i innowacyjności technologii	Należy wskazać, które technologie są już istniejące i zwalidowane, a które nowe i wymagają dodatkowej oceny ryzyka. Dla nowych technologii należy opracować plan działań, taki jak testy, walidacja.
Ocena komponentów przeniesionych (carry-over)	Należy ocenić, czy komponenty przeniesione z innych projektów spełniają aktualne wymagania klienta, obciążenia aplikacyjne i wymagania trwałościowe.
Weryfikacja listy materiałowej (BOM)	Weryfikacja poprawności musi obejmować CAD 3D, rysunki 2D i BOM. Trzeba potwierdzić zgodność BOM z projektem i uwzględnienie wszystkich części-> realizowane poprzez proces Design Review.
Ocena wymiarowania i tolerancji geometrycznych (GD&T)	Rysunki 2D należy poddać audytowi pod kątem prawidłowego zastosowania tolerancji geometrycznych zgodnych z GD&T. Tolerancje powinny być odpowiednio dobrane, umożliwiać stosowanie standardowych przyrządów pomiarowych oraz zapewniać zgodność z wymaganiami całego pojazdu-> realizowane poprzez proces Design Review.
Analiza tolerancji i łańcuchów wymiarowych	Analiza sumowania tolerancji dla kluczowych punktów interfejsu i cech specjalnych. Wyniki muszą pokazać, że ryzyko niezgodności wymiarowych jest kontrolowane-> realizowane poprzez proces Design Review.
Plan i wyniki walidacji	Należy przygotować plan walidacji, wykonać analizy wstępne CAE, przeprowadzić testy fizyczne, a następnie przedstawić wyniki potwierdzające, że produkt spełnia założone wymagania.
Weryfikacja zgłoszeń patentowych	Należy potwierdzić zgłoszenia patentowe dla nowych. Wskazać, w jaki sposób patenty lub własność intelektualna Tenneco są wykorzystywane w projekcie.
Ocena ryzyka własności intelektualnej	Należy ocenić ryzyko związane z prawami patentowymi i jego wpływ na projekt i procesy. Analiza obejmuje również transfer projektów i procesów między regionami.
Plan kontroli dla fazy rozwoju produktu	Przygotowanie planu kontroli dla fazy rozwoju produktu, uwzględniającego cechy specjalne/krytyczne i wymagania klienta. Określenie parametrów, które będą mierzone i kontrolowane w produkcji prototypowej.
Rekomendacje i Lessons Learned	W trakcie projektu należy rejestrować dobre praktyki i wnioski (Lessons Learned). Ważne, aby rekomendacje były przekazywane do innych projektów i wspierały doskonalenie procesów.

Jako przykład praktycznego zastosowania pytań pomocniczych w ramach Technical Review został wybrany temat związany ze **Specyfikacją wymagań klienta (SOR Assessment)**, który znajduje się jako pierwszy na liście arkusza Technical Review (Tabela 3.7.9.2.). Obszar ten pełni szczególnie istotną rolę, ponieważ dotyczy weryfikacji zgodności projektu z wymaganiami przekazanymi przez klienta oraz ich pełnego wdrożenia do procesu rozwoju produktu. Wymagania te obejmują zarówno aspekty konstrukcyjne i funkcjonalne, jak i kryteria niezawodności, bezpieczeństwa czy uwarunkowania montażowe. W praktyce są one jednym z głównych punktów odniesienia w procesie APQP i stanowią podstawę do oceny, czy produkt spełnia oczekiwania odbiorcy oraz może zostać zintegrowany w końcowej aplikacji, jaką jest pojazd.

Pytania pomocnicze zawarte w tej części Technical Review pozwalają w sposób systematyczny ocenić, czy wszystkie wymagania zostały jednoznacznie zdefiniowane, udokumentowane i skomunikowane między stronami. Szczególna uwaga zwracana jest na kwestie podziału odpowiedzialności pomiędzy klienta, Tenneco i ewentualnych dostawców nominowanych, znajomość języka technicznego stosowanego w dokumentacji, a także dostępność aktualnych wymagań specyficznych klienta (CSR). Kolejnym obszarem oceny jest kompletność danych wejściowych, w tym wartości wytrzymałościowych niezbędnych do analiz CAE, przewidywanych obciążeń bocznych czy wymagań związanych z niezawodnością i sytuacjami ekstremalnymi.

Istotne jest również odniesienie do wymagań związanych z montażem oraz eksploatacją – od lokalizacji amortyzatora w pojeździe i potencjalnych ryzyk środowiskowych (wibracje, zabrudzenia, uderzenia kamieni), po wymagania dotyczące powłok ochronnych, połączeń elektrycznych i aspektów wizualnych w przypadku widoczności komponentów. Dopełnieniem oceny jest weryfikacja zgodności parametrów rzeczywistych (masa, tarcie) z wartościami docelowymi oraz potwierdzenie, że klient dostarczył pełny zestaw danych wejściowych koniecznych do realizacji analiz i testów walidacyjnych.

Tabela 3.7.9.2. Pytania pomocnicze stosowane w Technical Review dla obszaru Specyfikacji wymagań klienta (opracowanie własne)

Specyfikacja wymagań klienta (SOR Assessment)	
Nr	Pytanie szczegółowe / pomocnicze
1	Czy podział odpowiedzialności za projekt jest jednoznacznie zdefiniowany i udokumentowany oraz zgodny z oczekiwaniami klienta?
2	W przypadku dostawców nominowanych przez klienta – czy zakres odpowiedzialności został precyzyjnie przypisany pomiędzy zainteresowane strony (Klient / Tenneco / Dostawca)?
3	Czy stosowany język w wymaganiach technicznych klienta jest znany zespołowi projektowemu i nie stanowi bariery komunikacyjnej?
4	Czy najnowsze wymagania specyficzne klienta (CSR) zostały udostępnione, przeanalizowane, zaakceptowane i wdrożone w projekcie?
5	Czy zespół dysponuje kompletem wymaganych danych wytrzymałościowych do przeprowadzenia analiz CAE?
6	Czy określono i zweryfikowano maksymalne przewidywane obciążenie boczne dla amortyzatora (np. praca sprężyny, kinematyka)?
7	Czy wszystkie wymagania funkcjonalne oraz specyfikacje dotyczące niezawodności co do modułu i komponentów amortyzatora zostały jednoznacznie zdefiniowane oraz formalnie potwierdzone
8	Czy dostępne są wymagania dotyczące sytuacji ekstremalnych lub zdarzeń specjalnych (misuse / special events) wymaganych przez klienta?
9	Czy ustalono położenie amortyzatora w pojeździe oraz sąsiednich elementów (np. układ wydechowy, bateria) i zidentyfikowano ryzyka wymagające dodatkowej ochrony termicznej?
10	Czy istnieje lista komponentów przewidzianych jako części tuningowe oraz określono, które elementy będą jako części tuningowe w fazie rozwoju produktu?
11	Czy połączenia elektryczne (np. zawory aktywne, czujniki ciśnienia) są zgodne ze standardami projektowymi i wymaganiami klienta?
12	Czy wymagania dotyczące powłok ochronnych zostały określone, potwierdzone i uwzględnione w planie kontroli?
13	Czy sposób montażu w pojeździe oraz dodatkowe ryzyka (wibracje, zabrudzenia, uderzenia kamieni) zostały przeanalizowane?
14	Czy proces montażu modułu jest jednoznacznie zdefiniowany (jedna lokalizacja vs. podział na podzespoły)?
15	Czy rzeczywista masa komponentu została zmierzona i porównana z wymaganiami klienta?
16	Czy rzeczywiste wartości tarcia zostały zmierzone i potwierdzone względem wartości docelowych?
17	Czy zespół projektowy posiada komplet danych wejściowych do rozpoczęcia prac CAD/CAE oraz wszystkie wymagane parametry bezpieczeństwa geometrycznego?
18	Czy klient dostarczył pełny zestaw danych wejściowych niezbędnych do analizy ryzyka oraz testów walidacyjnych?
19	Jeżeli elementy modułu są widoczne w pojeździe – czy klient określił wymagania wizualne?

Tego rodzaju usystematyzowane podejście pozwala traktować sekcję Specyfikacja wymagań klienta nie tylko jako formalną weryfikację dokumentów, ale także jako praktyczne narzędzie do identyfikacji luk i ryzyk na wczesnym etapie rozwoju produktu. Dzięki temu zespół

projektowy może z wyprzedzeniem podejmować działania korygujące, ograniczając prawdopodobieństwo wystąpienia niezgodności na poziomie prototypów czy walidacji.

Ewolucja Technical Review opiera się przede wszystkim na rozwoju i doskonaleniu listy pytań pomocniczych. W miarę gromadzenia doświadczeń projektowych lista ta podlega ciągłym modyfikacjom – nowe pytania są dodawane w sytuacjach, gdy w innych programach ujawnione zostają ryzyka lub niezgodności wymagające dodatkowej kontroli, natomiast pytania nieadekwatne lub źle sformułowane są usuwane z arkusza. Taki mechanizm aktualizacji sprawia, że narzędzie pozostaje żywe i dynamiczne, a jego skuteczność rośnie wraz z kolejnymi iteracjami. Dzięki temu Technical Review nie tylko odzwierciedla wymagania normatywne i standardy wewnętrzne, ale także gromadzi wiedzę organizacyjną w postaci doświadczeń i wniosków z wcześniejszych projektów, czyniąc proces przeglądu coraz bardziej efektywnym i ukierunkowanym na rzeczywiste źródła ryzyka.

3.7.10 Prezentacja wyników wdrożenia Technical Review

Rozdział poświęcony prezentacji wyników badań Technical Review rozpoczyna się od zestawienia niezgodności, które stanowi punkt wyjścia do dalszej analizy (tabela 3.7.10.1). Klasyfikacja ta obejmuje zarówno dane z fazy walidacyjnej, jak i z etapu pełnego wdrożenia, co pozwala na uchwycenie zmian w charakterze i częstotliwości niezgodności w miarę dojrzewania narzędzia. Następnie omówiono wyniki uzyskane w dwóch odrębnych fazach stosowania Technical Review. Pierwsza z nich to faza walidacji, w której przeprowadzono pięć przeglądów mających na celu ocenę skuteczności i użyteczności instrumentu w praktyce projektowej. Druga faza dotyczy pełnego wdrożenia, w ramach którego przeanalizowano jedenaście projektów, co pozwoliło na ocenę narzędzia w rzeczywistych warunkach rozwoju amortyzatorów. Walidacja tego typu narzędzi umożliwia ich udoskonalanie przed szerszym zastosowaniem, a tym samym zwiększa efektywność w identyfikacji i eliminacji ryzyk w późniejszych projektach.

Integralnym elementem prezentacji wyników jest klasyfikacja niezgodności, która stanowi podstawę do dalszej analizy ilościowej i jakościowej. W klasyfikacji Red/Yellow/Green (RYG) niezgodności przypisywano do całego projektu i traktowano w sposób ogólny. Pozwalało to na szybkie wskazanie obszarów ryzyka, ale nie umożliwiało precyzyjnej identyfikacji źródeł niezgodności ani ich szczegółowej analizy. W ramach Technical Review każda niezgodność została powiązana z odpowiednim obszarem technicznym, co umożliwiło dokładniejsze wskazanie przyczyn i bardziej ukierunkowane planowanie działań korygujących.

Oznaczenie R/Y/G	Kategoria R/Y/G	Podkategoria R/Y/G	Oznaczenie Technical Review	Kategoria niezgodności	Podkategoria niezgodności
1_RYG	Niespełnienie wymagań dotyczących walidacji produktu	Walidacja nie uwzględniła krytycznych scenariuszy zastosowania; Wewnętrzne testy walidacyjne nie zapewniają potwierdzenia zgodności; Wyniki walidacji u klienta wskazują na niespełnienie wymagań	1_TR	Niezgodność w realizacji testów i walidacji	Brak ukończenia testów, brak danych wejściowych; Niespełnienie kryteriów korozyjnych czy wytrzymałościowych; Brak potwierdzenia spełnienia wymagań
2_RYG	Niezgodności w dokumentacji projektowej (technicznej i jakościowej)	Rozbieżności, braki lub niespójności w dokumentacji technicznej CAD / GPDM; Niepełne, niejednoznaczne lub błędnie odwzorowane wymagania klienta w dokumentacji	2_TR	Niezgodność w dokumentacji projektowej i jakościowej	Brak aktualizacji DFMEA; Brak Design Review; Niekompletne plany walidacji
			3_TR	Niezgodność w strukturze BOM i oznaczeniach części	Niezaimplementowane zmiany w BOM; Brak zgodności listy charakterystyk specjalnych; Błędne etykiety lub lokalizacja oznaczeń
3_RYG	Niespełnienie wymagań materiałowych lub komponentowych	Zmienność parametrów materiałowych wpływająca na stabilność funkcji wyrobu; Komponenty dostarczone spoza zatwierdzonej listy źródeł (brak zatwierdzenia przez klienta lub organizację); Niezgodność cech fizykochemicznych materiału z wymaganiami specyfikacji technicznej; Brak zgodności komponentów z aktualną dokumentacją projektową (np. rysunek, specyfikacja klienta); Brak potwierdzenia zgodności materiałów lub komponentów w dokumentacji jakościowej (np. certyfikaty, wyniki testów)	4_TR	Niezgodność w danych technicznych komponentów	Błędne dane materiałowe; Brak charakterystyki odkształcenia elementów gumowych; Niewłaściwe parametry konstrukcyjne
			5_TR	Niezgodność w zarządzaniu wymaganiami dostawców	Brak lub niepełne wymagania od dostawców; Brak potwierdzenia przy zmianie procesu u dostawcy
4_RYG	Niedotrzymanie terminów projektowania i wdrażania	Brak działań usprawniających produkt lub proces na etapie rozwoju; Opóźnienia wynikające z ograniczonej dostępności zasobów do walidacji; Niedotrzymanie harmonogramu realizacji wymagań klienta lub wewnętrznych	6_TR	Niezgodność z wymaganiami klienta	Brak potwierdzenia spełnienia wymagań; Walidacja wg zmienionych kryteriów
5_RYG	Niezgodności w realizacji procesu produkcyjnego	Proces realizowany z odchyleniami od zatwierdzonych parametrów technologicznych; Nieprzestrzeganie zatwierdzonych instrukcji operacyjnych; Konieczność ponownego przetworzenia wyrobu (rework, reprocessing)	7_TR	Niezgodność w procesach produkcyjnych i kontrolnych	Brak kontroli parametrów po przeniesieniu procesu; Błędne metody pomiarowe; Brak weryfikacji stabilności procesu

Tabela 3.7.10.1. Klasyfikacja niezgodności w Technical Review, przejście z kategorii niezgodności występujących w R/Y/G do kategorii niezgodności Technical Review (opracowanie własne)

Tabela 3.7.10.2. Klasyfikacja niezgodności w Technical Review przedstawia zestawienie niezgodności zidentyfikowanych podczas przeglądów, zgrupowanych według głównych obszarów technicznych. Dzięki temu możliwe jest nie tylko ogólne wskazanie, że w projekcie wystąpiła niezgodność, ale także określenie, do którego obszaru działalności inżynierskiej się on odnosi, co zwiększa efektywność analiz oraz wspiera podejmowanie działań prewencyjnych.

W celu przejrzystego przedstawienia wyników badań Technical Review zastosowano kryteria klasyfikacji niezgodności oparte na wpływie na funkcję produktu końcowego. Podejście to jest spójne z metodyką stosowaną w Design Review, co umożliwia porównywanie rezultatów uzyskiwanych w ramach obu instrumentów. Tabela 3.7.9.1 prezentuje szczegółowe kryteria oceny, które pozwalają na jednoznaczne przypisanie poziomu niezgodności – od 0, oznaczającego krytyczne ryzyko dla bezpieczeństwa i funkcji głównej produktu, do 10, odpowiadającego pełnej zgodności i braku niezgodności.

Tabela 3.7.10.2. Kryteria oceny niezgodności z Technical Review-takie same jak w Design Review (opracowanie własne)

Poziom oceny	Kryteria klasyfikacji niezgodności ze względu na funkcje produktu końcowego
10	Brak niezgodności
6	Wymagania klienta, normy branżowe lub standardy projektowe nie są spełnione; niezgodność może powodować obniżenie komfortu użytkowania (tzw. „annoyance”) lub inne problemy wizualne/akustyczne, nie wpływające na funkcję główną produktu końcowego.
4	Wymagania klienta, normy branżowe lub standardy projektowe nie są spełnione; niezgodność wpływa na funkcje drugorzędne produktu końcowego, ograniczając ich poprawne działanie lub funkcjonalność.
0	Wymagania klienta, normy branżowe lub kluczowe standardy projektowe nie są spełnione; niezgodność wiąże się z wysokim ryzykiem dla bezpieczeństwa, niezgodnością regulacyjną lub bezpośrednim zagrożeniem dla funkcji głównej produktu końcowego.

Wyniki zebrane podczas fazy walidacji przedstawiono w formie graficznej, co pozwala na szybkie uchwycenie zarówno liczby, jak i poziomu znaczenia zidentyfikowanych niezgodności. Na rysunku 3.7.10.1 zaprezentowano liczbę niezgodności przypisanych do poszczególnych poziomów znaczenia, co umożliwia ocenę, które obszary wymagały działań korygujących już na etapie planowania jakości projektu. Dzięki temu możliwe było nie tylko zweryfikowanie skuteczności narzędzia, ale także wskazanie kierunków jego dalszego doskonalenia.

Analiza wyników przedstawionych na rysunku 3.7.10.1 wskazuje, że w fazie walidacji narzędzia Technical Review zidentyfikowano łącznie 12 niezgodności, rozłożonych na trzy poziomy oceny. Najliczniejszą grupę stanowiły niezgodności przypisane do poziomu znaczenia 4 – odnotowano ich 5 przypadków. Oznacza to, że w kilku obszarach wymagania klienta, normy branżowe lub

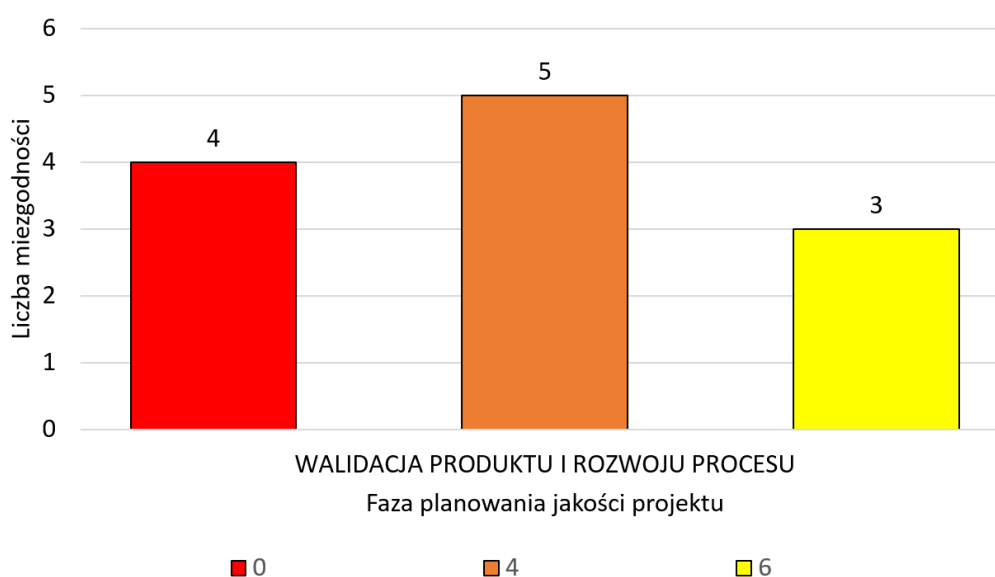
standardy projektowe nie zostały w pełni spełnione, co wpływało na funkcje drugorzędne produktu końcowego.

Istotną grupę stanowiły również niezgodności o poziomie znaczenia 0 – łącznie 4 przypadki. Były to sytuacje krytyczne, w których niespełnienie wymagań wiązało się z ryzykiem regulacyjnym lub bezpośrednim zagrożeniem dla funkcji głównej amortyzatora.

Najmniejszą liczbę niezgodności odnotowano na poziomie znaczenia 6 – 3 przypadki. Dotyczyły one niezgodności mogących obniżyć komfort użytkowania (np. problemy wizualne lub akustyczne), jednak bez wpływu na główną funkcję produktu.

Warto zaznaczyć, że wszystkie projekty analizowane w fazie walidacji instrumentu znajdowały się w etapie walidacji produktu i rozwoju procesu. z jednej strony umożliwiło to weryfikację kompletności dokumentacji, planów walidacyjnych i zgodności procesów produkcyjnych, z drugiej jednak ograniczało możliwość pełnej oceny skuteczności narzędzia w wychwytywaniu ryzyk pojawiających się we wcześniejszych fazach.

Podsumowując, rozkład poziomów znaczenia niezgodności pokazuje zróżnicowany charakter niezgodności, od krytycznych odchyłeń po kwestie związane z komfortem użytkowania, co potwierdza szerokie spektrum obszarów objętych oceną w ramach Technical Review.



Rysunek 3.7.10.1. Liczba i poziom znaczenia niezgodności podczas etapu walidowania instrumentu Technical Review (opracowanie własne)

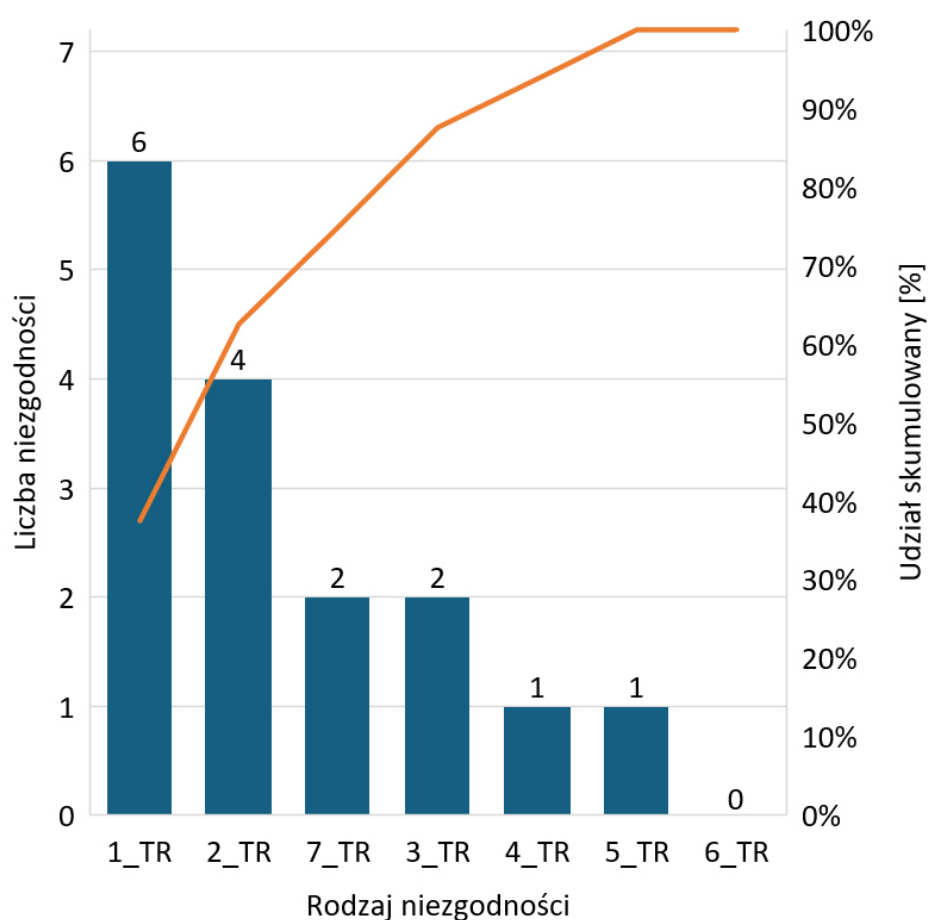
Analiza danych przedstawionych na rysunku 3.7.10.2 wskazuje, że w fazie walidacji instrumentu Technical Review zidentyfikowano 16 niezgodności, które zostały przypisane do poszczególnych kategorii narzędzia. Najczęściej występującą grupą była 1_TR – niezgodności w realizacji testów i walidacji, obejmująca 6 przypadków, co stanowi 37,5% wszystkich zarejestrowanych problemów. Kategoria ta wyraźnie dominuje i wskazuje na szczególne znaczenie obszaru walidacji w ocenie skuteczności projektów.

Na drugim miejscu znalazła się 2_TR – niezgodności w dokumentacji projektowej i jakościowej, z 4 przypadkami (25% całości). Łącznie z kategorią 1_TR odpowiada ona już za ponad 62% wszystkich niezgodności, co podkreśla znaczenie zarówno poprawności realizacji testów, jak i kompletności dokumentacji technicznej.

Kolejnymi w hierarchii były 7_TR – niezgodności w procesach produkcyjnych i kontrolnych oraz 3_TR – niezgodności w strukturze BOM i oznaczeniach części, w których zidentyfikowano po 2 przypadki (12,5% każda). Stanowią one uzupełniające, lecz istotne źródło ryzyka, związane odpowiednio z utrzymaniem stabilności procesów oraz poprawnością zarządzania strukturą produktu.

Najrzadziej występowały niezgodności w obszarach 4_TR – dane techniczne komponentów i 5_TR – zarządzanie wymaganiami dostawców (po 1 przypadek, czyli 6,25%). w badanych projektach nie odnotowano natomiast problemów w kategorii 6_TR – zgodność z wymaganiami klienta.

Łącznie trzy dominujące kategorie (1_TR, 2_TR i 7_TR) odpowiadają za 75% wszystkich niezgodności, co jednoznacznie wskazuje na kluczowe obszary wymagające szczególnej uwagi w procesach dalszego doskonalenia.

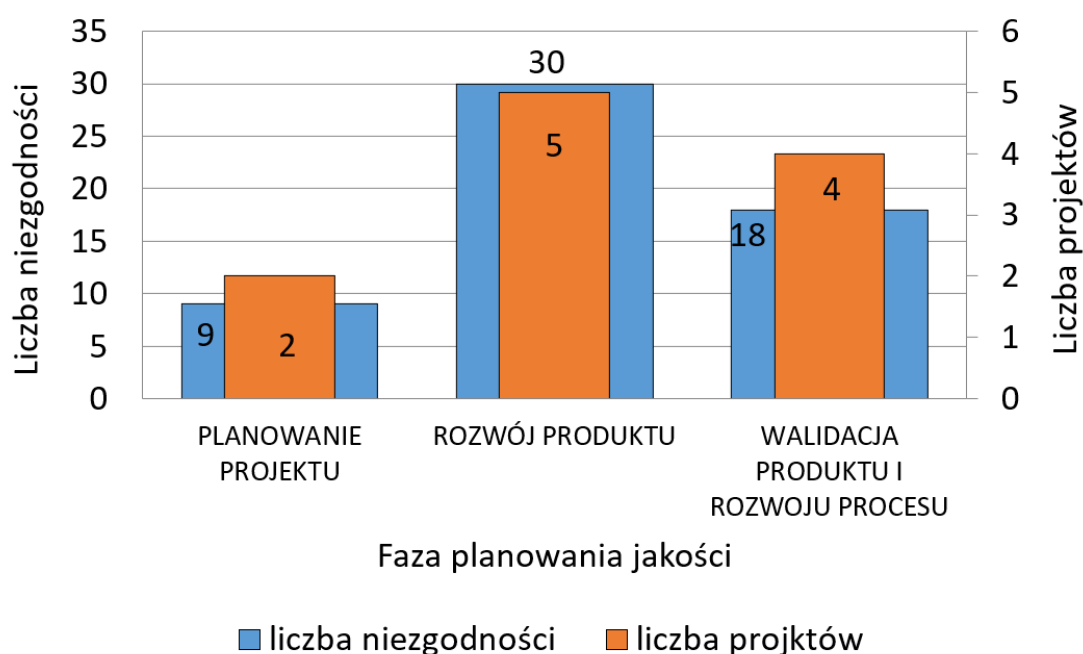


Rysunek 3.7.10.2. Analiza Pareto niezgodności, walidacja Technical Review (opracowanie własne)

W celu pełniejszej oceny skuteczności narzędzia Technical Review w fazie pełnego wdrożenia przeanalizowano nie tylko łączną liczbę zidentyfikowanych niezgodności, ale także ich rozkład w odniesieniu do liczby projektów przypadających na poszczególne etapy planowania jakości. Takie zestawienie pozwala określić średnią intensywność występowania problemów i porównać ryzyko charakterystyczne dla każdej fazy rozwoju amortyzatorów sterowanych elektronicznie. Wyniki przedstawiono na rysunku 3.7.10.3, który obrazuje zależność pomiędzy liczbą niezgodności a liczbą przeanalizowanych projektów w trzech kluczowych fazach planowania jakości: planowaniu projektu, rozwoju produktu oraz walidacji produktu i procesu.

W fazie planowania projektu przeanalizowano 2 projekty, w których zidentyfikowano 9 niezgodności, co daje średnio 4,5 niezgodności na projekt. Najwięcej niezgodności odnotowano w fazie rozwoju produktu. w 5 projektach zarejestrowano 30 niezgodności, co odpowiada średnio 6 niezgodności na projekt. w fazie walidacji produktu i rozwoju procesu przeanalizowano 4 projekty, w których wykryto 18 niezgodności, co daje średnio 4,5 niezgodności na projekt.

Rozkład liczby niezgodności wskazuje na wyraźne różnice pomiędzy poszczególnymi fazami. Największe obciążenie niezgodnościami przypadało na etap rozwoju produktu, natomiast w fazach planowania oraz walidacji intensywność niezgodności w przeliczeniu na projekt była zbliżona.



Rysunek 3.7.10.3. Liczba niezgodności vs ilość przeanalizowanych projektów w poszczególnych fazach planowania jakości – pełne wdrożenie Technical Review (opracowanie własne)

Na wykresie (rys 3.7.10.4) przedstawiono rozkład niezgodności zidentyfikowanych podczas pełnego wdrożenia Technical Review w odniesieniu do poszczególnych faz planowania jakości,

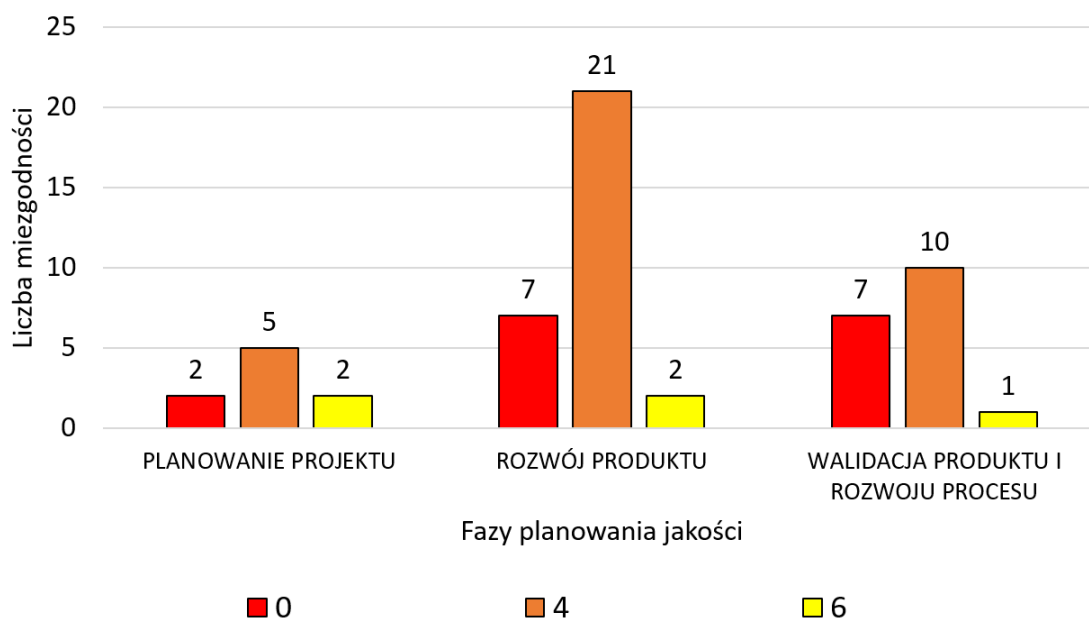
z podziałem na ich poziomy znaczenia (0, 4 i 6). Łącznie odnotowano 57 niezgodności, które różniły się zarówno liczbą, jak i charakterem w zależności od etapu projektu.

W fazie planowania projektu wystąpiło 9 niezgodności, w tym 2 krytyczne (poziom znaczenia 0), 5 związanych z funkcjami drugorzędnymi (poziom znaczenia 4) oraz 2 odnoszące się do cech użytkowych i komfortu (poziom znaczenia 6).

Największa liczba niezgodności pojawiła się w fazie rozwoju produktu – łącznie 30 niezgodności. Dominowały tu niezgodności o poziomie 4 (21 przypadków), wskazujące na ograniczenia funkcji drugorzędnych, przy jednoczesnym występowaniu 7 niezgodności krytycznych (poziom znaczenia 0) i 2 o charakterze użytkowym (poziom znaczenia 6).

W fazie walidacji produktu i rozwoju procesu zidentyfikowano 18 niezgodności. Najwięcej z nich dotyczyło poziomu znaczenia 4 (10 przypadków), obok 7 krytycznych niezgodności (poziom znaczenia 0) i 1 związanej z komfortem użytkowania (poziom znaczenia 6).

Podsumowując, największe obciążenie niezgodnościami odnotowano w fazie rozwoju produktu, a we wszystkich fazach dominowały niezgodności poziomu znaczenia 4. Warto jednak zaznaczyć, że istotna liczba niezgodności krytycznych (poziom znaczenia 0) pojawiała się systematycznie w każdej fazie, co pokazuje, że ryzyka o najwyższej wadze występują niezależnie od etapu rozwoju projektu.

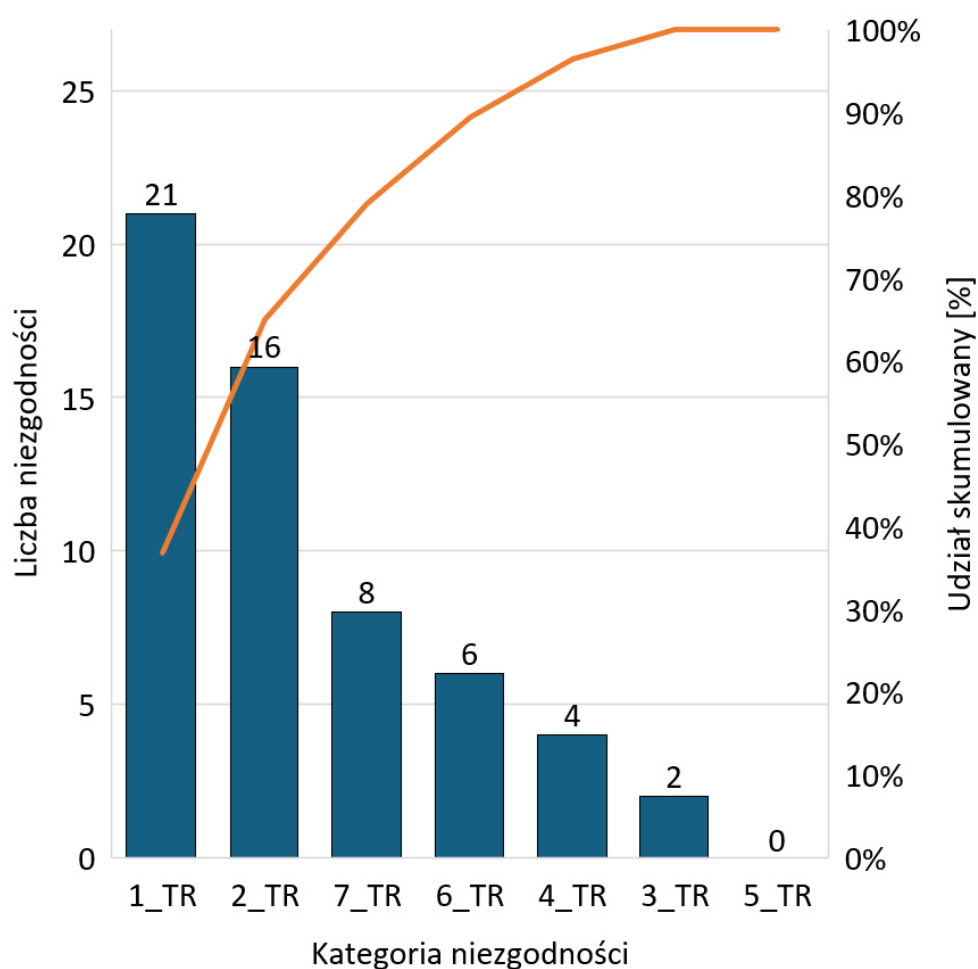


Rysunek 3.7.10.4. Liczba i poziom znaczenia niezgodności vs. fazy planowania jakości – pełne wdrożenie Technical Review (opracowanie własne)

Na wykresie Pareto (rys. 3.7.10.5) przedstawiono rozkład niezgodności zidentyfikowanych podczas pełnego wdrożenia Technical Review w podziale na kategorie narzędzia. Łącznie zarejestrowano 57 niezgodności, które rozłożyły się w różnym stopniu na poszczególne obszary.

Najwięcej niezgodności wystąpiło w kategorii 1_TR – niezgodności w realizacji testów i walidacji, gdzie odnotowano 21 przypadków, co stanowi około 37% wszystkich niezgodności. Drugą pod względem liczności kategorią była 2_TR – niezgodności w dokumentacji projektowej i jakościowej, z 16 przypadkami, czyli około 28% całości. Te dwie kategorie łącznie odpowiadają za ponad 65% wszystkich problemów, co jednoznacznie wskazuje, że obszary związane z dokumentacją oraz walidacją pozostają najbardziej krytyczne w badanych projektach.

W dalszej kolejności pojawiały się niezgodności związane z procesami produkcyjnymi i kontrolnymi, które zaklasyfikowano jako 7_TR i których odnotowano 8 przypadków, co stanowi 14% całości. Następnie uplasowała się kategoria 6_TR – zgodność z wymaganiami klienta, w której wystąpiło 6 przypadków (11%). Mniejszą, ale wciąż zauważalną liczbę stanowiły niezgodności dotyczące danych technicznych komponentów, zaliczone do 4_TR i obejmujące 4 przypadki (7%). Najmniej problemów stwierdzono w obszarze struktury BOM i oznaczeń części (3_TR), gdzie odnotowano zaledwie 2 przypadki, czyli 3% całości. w analizowanych projektach nie wystąpiły żadne niezgodności związane z zarządzaniem wymaganiami dostawców, klasyfikowane jako 5_TR.



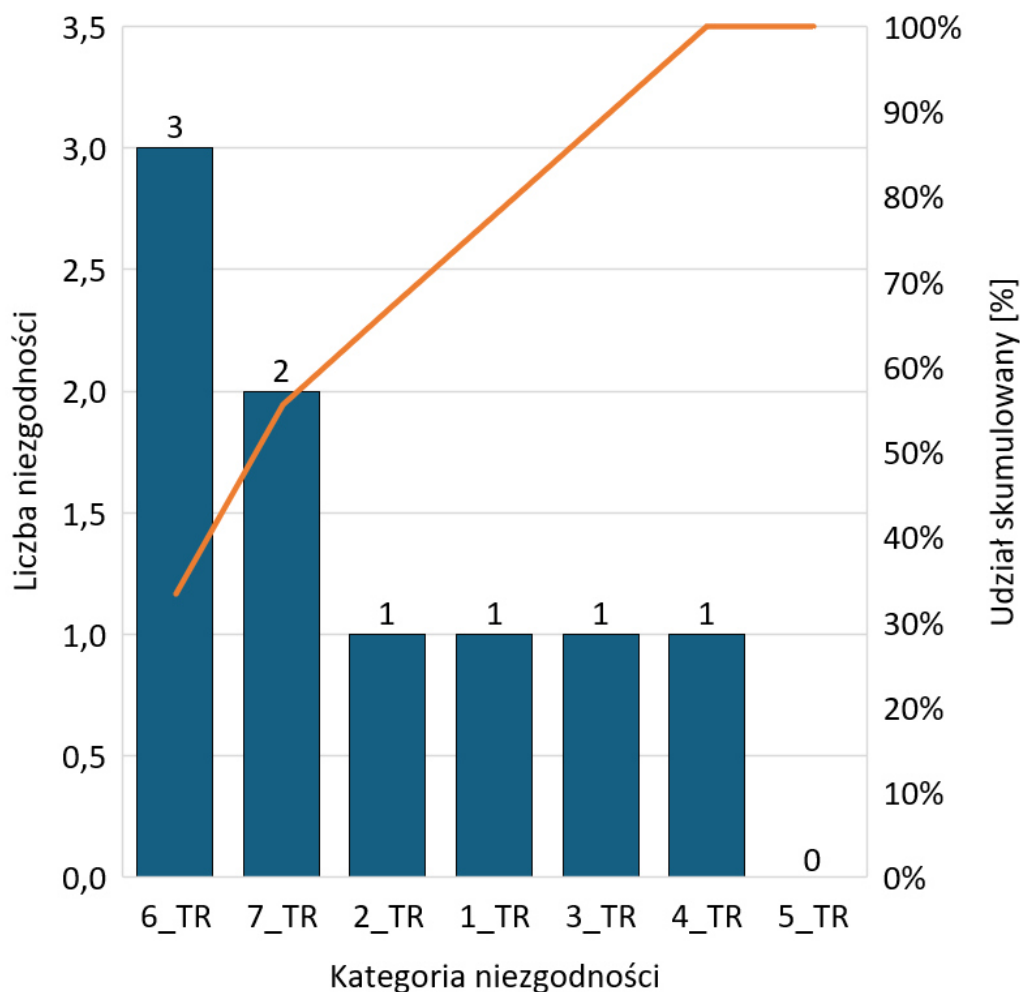
Rysunek 3.7.10.5. Analiza Pareto niezgodności – pełne wdrożenie Technical Review (opracowanie własne)

Podsumowując, analiza Pareto pokazuje wyraźną koncentrację niezgodności w dwóch dominujących obszarach: walidacji oraz dokumentacji projektowej. Razem z procesami produkcyjnymi i kontrolnymi stanowią one ponad 80% wszystkich zidentyfikowanych niezgodności, co potwierdza ich kluczową rolę w zapewnieniu jakości projektów amortyzatorów sterowanych elektronicznie.

Analiza wyników przedstawionych na rysunku 3.7.10.6 wskazuje, że w fazie planowania projektu zidentyfikowano łącznie dziewięć niezgodności przypisanych do różnych kategorii Technical Review. Największą grupę stanowiły niezgodności związane ze zgodnością z wymaganiami klienta (6_TR), w których odnotowano trzy przypadki, co odpowiada 33,3% wszystkich problemów. Drugą pod względem liczności kategorią były niezgodności dotyczące procesów produkcyjnych i kontrolnych (7_TR), obejmujące dwa przypadki i stanowiące 22,2% całości.

Pozostałe niezgodności występowały pojedynczo, a każda z kategorii – realizacja testów i walidacji (1_TR), dokumentacja projektowa i jakościowa (2_TR), struktura BOM i oznaczenia części (3_TR) oraz dane techniczne komponentów (4_TR) – obejmowała po jednym przypadku, co przekłada się na udział 11,1% w ogólnej liczbie. w badanych projektach nie odnotowano natomiast niezgodności w obszarze wymagań dostawców (5_TR).

Podsumowując, ponad połowę wszystkich niezgodności, dokładnie 55,6%, skoncentrowano w dwóch obszarach: zgodności z wymaganiami klienta oraz procesów produkcyjnych i kontrolnych. Pozostałe problemy rozłożyły się równomiernie na cztery inne kategorie, co świadczy o ich bardziej jednostkowym charakterze.



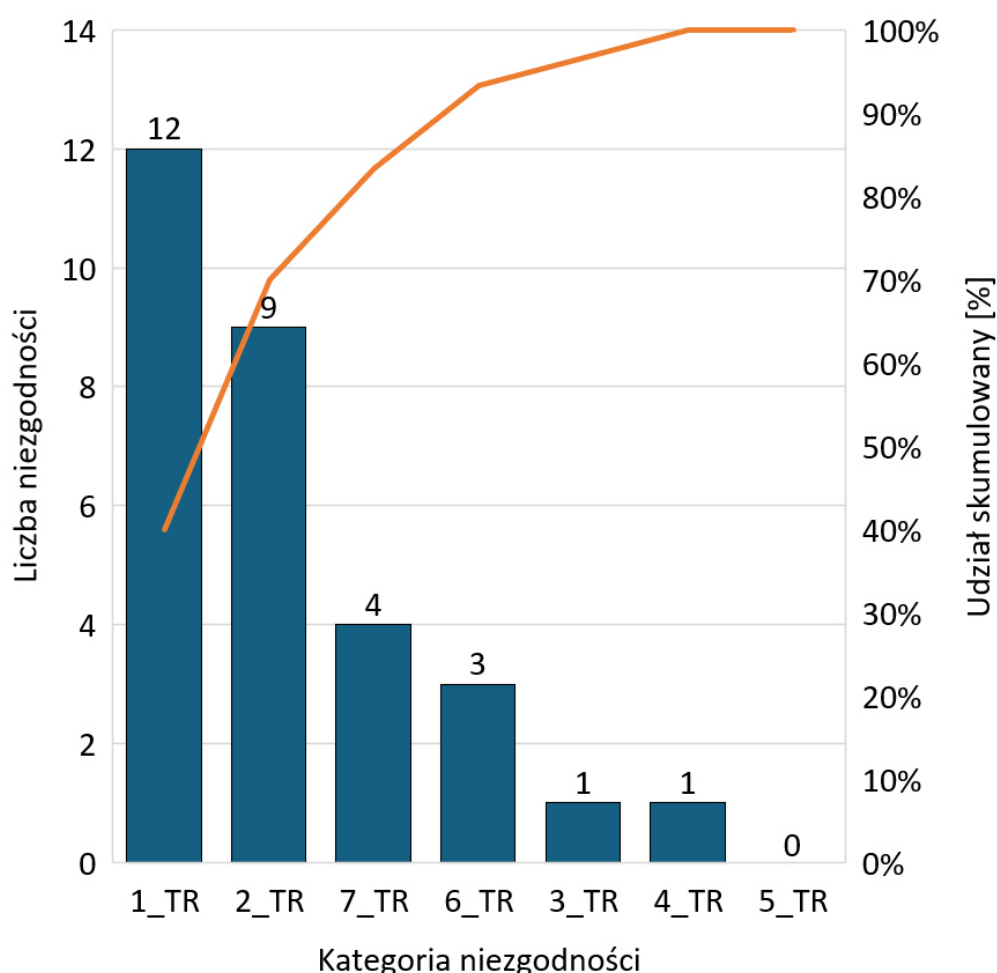
Rysunek 3.7.10.6. Analiza Pareto kategorii niezgodności występujących w fazie planowania projektu – pełne wdrożenie Technical Review (opracowanie własne)

Na wykresie (rys. 3.7.10.7) przedstawiono analizę Pareto niezgodności zidentyfikowanych w fazie rozwoju produktu w ramach pełnego wdrożenia Technical Review. Łącznie odnotowano 30 niezgodności, które rozłożyły się na sześć kategorii.

Największą grupę stanowiły niezgodności w realizacji testów i walidacji (1_TR) – 12 przypadków, co odpowiada 40% wszystkich problemów. Drugą pod względem częstości kategorią były niezgodności w dokumentacji projektowej i jakościowej (2_TR), w których odnotowano 9 przypadków, czyli 30% całości. Obie te kategorie łącznie odpowiadają za 70% wszystkich zidentyfikowanych niezgodności, co wyraźnie wskazuje na ich dominującą rolę w analizowanej fazie.

Kolejne miejsca zajmowały: 7_TR – procesy produkcyjne i kontrolne z 4 przypadkami (13,3%), 6_TR – zgodność z wymaganiami klienta z 3 przypadkami (10%) oraz pojedyncze niezgodności w obszarze 3_TR – struktura BOM i oznaczenia części i 4_TR – dane techniczne komponentów (po 1 przypadku, czyli po 3,3%). w tej fazie nie zarejestrowano żadnych problemów w kategorii 5_TR – wymagania dostawców.

Podsumowując, analiza pokazuje, że dominującymi źródłami niezgodności w fazie rozwoju produktu były obszary związane z realizacją testów i walidacji oraz kompletnością dokumentacji projektowej. Pozostałe kategorie miały charakter uzupełniający i generowały znacznie mniejszą liczbę niezgodności.



Rysunek 3.7.10.7. Analiza Pareto kategorii niezgodności występujących w fazie rozwoju produktu - pełne wdrożenie Technical Review (opracowanie własne)

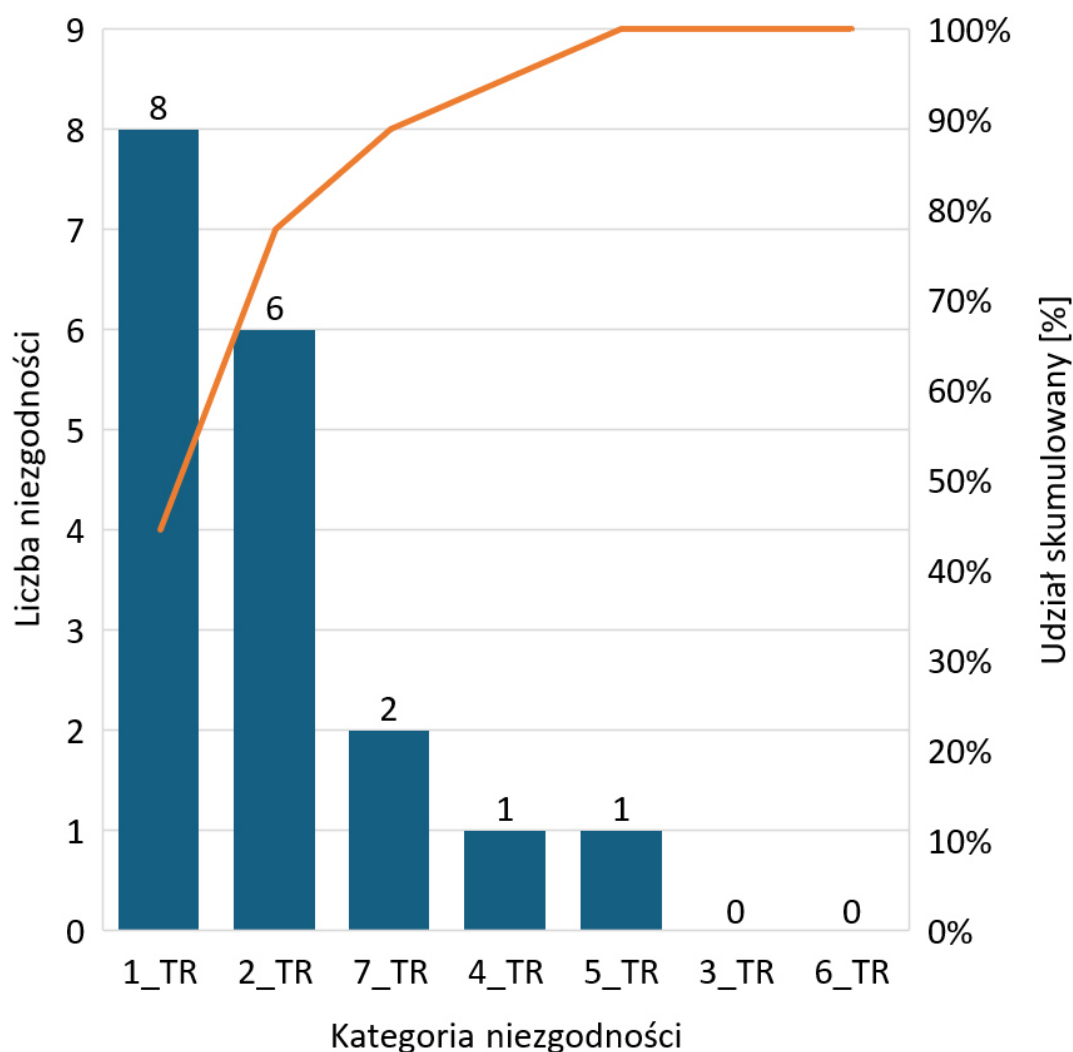
Na wykresie (rys. 3.7.10.8) zaprezentowano analizę Pareto niezgodności zidentyfikowanych w fazie walidowania produktu i rozwoju procesu w ramach pełnego wdrożenia Technical Review. Łącznie odnotowano 18 niezgodności, które rozłożyły się na sześć kategorii.

Największa liczba niezgodności wystąpiła w obszarze 1_TR – realizacja testów i walidacji, gdzie zarejestrowano 8 przypadków, co stanowi 44,4% wszystkich niezgodności. Drugą dominującą kategorią były 2_TR – niezgodności w dokumentacji projektowej i jakościowej, obejmujące 6 przypadków (33,3% całości). Te dwa obszary razem odpowiadają za prawie 80% wszystkich stwierdzonych niezgodności, co potwierdza ich kluczowe znaczenie w tej fazie projektu.

W dalszej kolejności odnotowano mniejszą liczbę niezgodności: 7_TR – procesy produkcyjne i kontrolne z 2 przypadkami (11,1%) oraz pojedyncze odchylenia w kategoriach 4_TR – dane

techniczne komponentów i 5_TR – wymagania dostawców (po 1 przypadku, czyli po 5,6%). w badanych projektach nie zarejestrowano niezgodności w obszarach 3_TR – struktura BOM i oznaczenia części oraz 6_TR – zgodność z wymaganiami klienta.

Podsumowując, największa liczba niezgodności w fazie walidowania produktu i rozwoju procesu koncentrowała się na jakości i kompletności przeprowadzanych testów oraz dokumentacji projektowej, podczas gdy pozostałe kategorie niezgodności miały charakter marginalny i obejmowały pojedyncze przypadki.



Rysunek 3.7.9.8. Analiza Pareto kategorii niezgodności występujących fazie walidowania produktu i rozwoju procesu - pełne wdrożenie Technical Review (opracowanie własne)

4. Analiza wyników i ocena skuteczności wdrożonych rozwiązań

Celem przeprowadzonych badań było zweryfikowanie hipotezy zakładającej, że dopasowanie i wdrożenie wybranych instrumentów planowania jakości ma istotny wpływ na poprawę skuteczności i efektywności procesu rozwoju oraz industrializacji nowoczesnych produktów mechatronicznych. Analiza została przeprowadzona na przykładzie amortyzatorów sterowanych elektronicznie.

Dyskusja wyników opiera się na porównaniu stanu procesu planowania jakości przed i po wdrożeniu nowych lub zmodyfikowanych instrumentów. Takie podejście pozwala ocenić, jak wprowadzone zmiany wpłynęły na proces planowania jakości, dokumentowanie wymagań klienta, przeglądy techniczne oraz eliminację niezgodności, a także umożliwia krytyczną ocenę skuteczności zastosowanych rozwiązań.

Analizie poddano trzy instrumenty planowania jakości:

- Design Review,
- Problem Definition Tool,
- Technical Review.

Każdy z ww. został opracowany lub dostosowany do specyfiki badanego przedsiębiorstwa, a następnie wdrożony w sposób umożliwiający systematyczne gromadzenie danych i ich późniejszą analizę porównawczą.

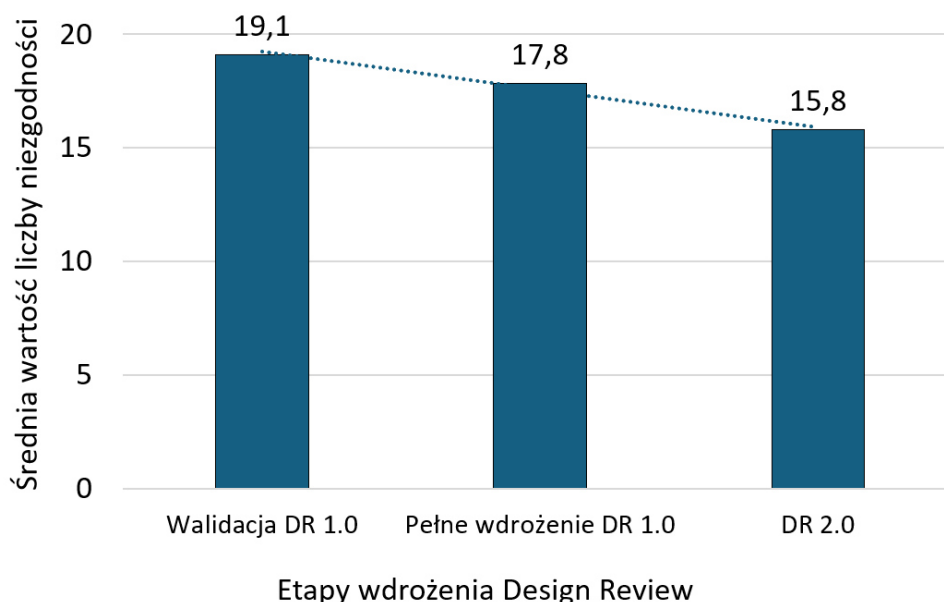
W kolejnych podrozdziałach przedstawiono wyniki badań i analiz w ujęciu ilościowym i jakościowym. Analiza ilościowa obejmuje m.in. porównanie liczby i struktury niezgodności. Analiza jakościowa koncentruje się na rodzaju i charakterze występujących niezgodności oraz zmianach w ich częstotliwości wystąpienia po wdrożeniu nowych instrumentów planowania jakości. Porównanie to obejmuje dominujące kategorie niezgodności, identyfikację obszarów szczególnie podatnych na błędy oraz ocenę, w jakim stopniu zmieniła się ich struktura i znaczenie w procesie rozwoju i industrializacji.

4.1. Ocena skuteczności wdrożenia Design Review

Przegląd dokumentacji projektowej (Design Review) to ustrukturyzowany proces służący zapewnieniu spójności, kompletności i zgodności danych w dokumentacji technicznej. Jego zadaniem jest także eliminacja niezgodności, które mogłyby eskalować w procesie RYG. Wszystkie zidentyfikowane niezgodności muszą być ujęte w planie działań korygujących i zapobiegawczych, a następnie przekazane do kolejnego etapu – Technical Review. Dzięki temu utrzymywana jest ciągłość doskonalenia oraz możliwość systematycznej weryfikacji skuteczności działań.

Na wykresie (rys. 4.1.1) przedstawiono średnią wartość liczby niezgodności identyfikowanych podczas poszczególnych etapów wdrożenia instrumentu Design Review. Widoczny jest trend spadkowy – z wartości 19,1 w fazie walidacji DR 1.0 do wartości 17,8 w pełnym wdrożeniu DR 1.0 (spadek o 1,3; 6,8%), a następnie do wartości 15,8 w przypadku DR 2.0 (spadek o 3,3; 17,3% względem wartości początkowej).

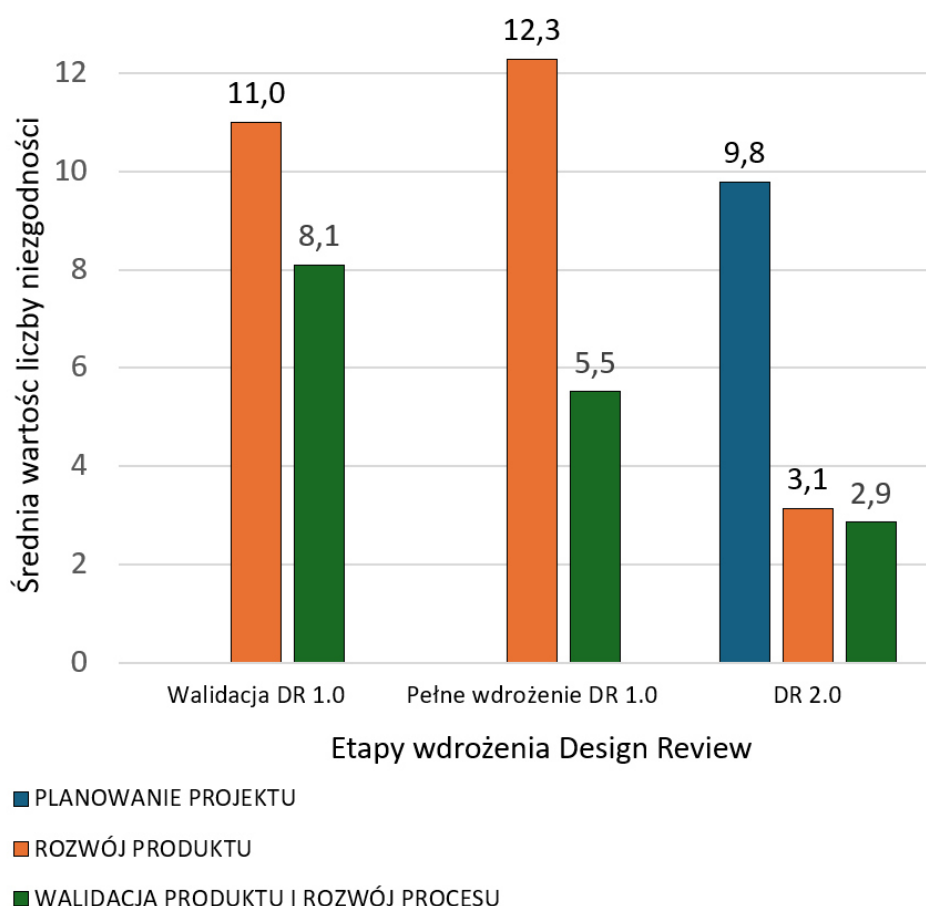
W początkowej fazie wdrożenia (walidacja DR 1.0) liczba wykrywanych niezgodności stanowi pozytywny efekt, ponieważ świadczy o zdolności narzędzia do wychwytywania niezgodności w dokumentacji projektowej, które wcześniej mogły pozostać niezidentyfikowane. w kolejnych etapach wdrożenia DR- po wdrożeniu działań korygujących i zapobiegawczych oczekiwany jest spadek liczby niezgodności – co oznacza, że proces został ustabilizowany i wyeliminowano powtarzalność niezgodności. Kończącą weryfikacją powyższego stwierdzenia będzie analiza niezgodności eskalowanych w procesie RYG pod kątem tego, czy ich źródłem były niezgodności w dokumentacji technicznej.



Rysunek 4.1.1. Średnia wartość liczby niezgodności w kolejnych etapach wdrożenia Design Review (opracowanie własne)

Na wykresie (rys. 4.1.2) zaprezentowano średnią liczbę niezgodności na projekt z podziałem na poszczególne fazy planowania jakości. w fazie walidacji DR 1.0 oraz w etapie pełnego wdrożenia DR 1.0 narzędzie nie było stosowane w fazie planowania projektu, dlatego brak jest danych w tym obszarze- ze względu na etapy realizacji projektu i decyzje kierownictwa przedsiębiorstwa. w obu etapach wdrożenia DR niezgodności identyfikowano głównie w fazie rozwoju produktu (odpowiednio 11,0 oraz 12,3), natomiast w fazie walidacji produktu i rozwoju procesu odnotowano wartości 8,1 oraz 5,5. Można więc zauważyć, że pełne wdrożenie DR 1.0 zwiększyło wykrywalność niezgodności w trakcie rozwoju produktu, co przełożyło się na ich spadek w fazie walidacji produktu i rozwoju procesu.

Pełne dane obejmujące wszystkie fazy uzyskano w etapie DR 2.0, kiedy proces DR był już w pełni wdrożony. DR zaczęto stosować również w fazie planowania projektu, gdzie średnio zidentyfikowano 9,8 liczby niezgodności. Jednocześnie odnotowano wyraźny spadek liczby niezgodności w fazie rozwoju produktu do poziomu 3,1 oraz w fazie walidacji produktu i rozwoju procesu do poziomu 2,9. Warto podkreślić, że na etapie walidacji produktu i rozwoju procesu DR 2.0 pełni rolę powtórnej weryfikacji, ponieważ projekty były zweryfikowane wcześniej w fazie rozwoju produktu poprzez zastosowanie DR 1.0. Świadczy to o tym, że główne niezgodności są identyfikowane i eliminowane na wcześniejszych fazach planowania jakości, a faza walidacji produktu i rozwoju procesu staje się potwierdzeniem status quo całego procesu.

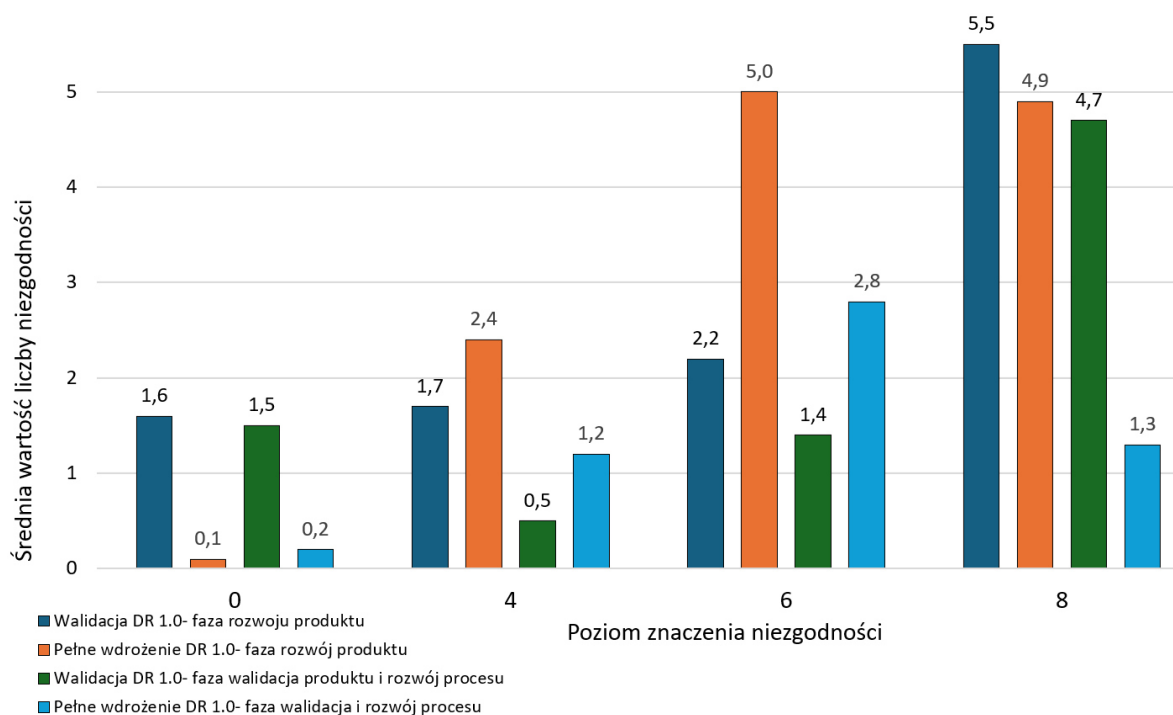


Rysunek 4.1.2. Średnia liczba niezgodności na projekt z podziałem na fazy planowania jakości dla kolejnych etapów wdrożenia Design Review (opracowanie własne)

Na wykresie (rys. 4.1.3) przedstawiono średnią wartość liczby niezgodności z podziałem na poziomy znaczenia niezgodności (0, 4, 6 i 8) oraz fazy planowania jakości – dla etapu walidacji DR 1.0 i pełnego wdrożenia DR 1.0. Poziom niezgodności odnosi się do ich klasyfikacji według znaczenia niezgodności zgodnie z kryteriami przedstawionymi w tabeli 3.7.2.2, gdzie wartości niższe oznaczają poważniejsze konsekwencje, a wyższe – niezgodności o charakterze średnim lub wtórnym dla spełnienia wymagań klienta.

W fazie rozwoju produktu zaobserwowano wyraźny wzrost liczby niezgodności na poziomie znaczenia 4 i 6 w etapie pełnego wdrożenia DR 1.0 w porównaniu z etapem walidacji DR 1.0. Oznacza to, że wraz z częstością użycia narzędzia udało się zidentyfikować większą liczbę niezgodności średniego wpływu w fazie rozwoju produktu. Z kolei dla poziomu znaczenia 0 nastąpił spadek liczby niezgodności do wartości bliskiej zeru, co świadczy o tym, że krytyczne niezgodności są eliminowane wcześniej i rzadziej trafiają do kolejnych faz planowania jakości.

W fazie walidacji i rozwoju procesu zaobserwowano odwrotną tendencję – w pełnym wdrożeniu DR 1.0 wartości dla poziomu znaczenia 6 i 8 są niższe niż w przypadku walidacji DR 1.0, co wskazuje na zmniejszenie częstości występowania niezgodności w fazie walidacji produktu i rozwoju procesu poprzez wcześniejsze wykrywanie niezgodności w fazie rozwoju produktu. Równocześnie odnotowano wzrost liczby niezgodności na poziomie znaczenia 4, co może oznaczać, że w fazie walidacji produktu i rozwoju procesu pozostają do weryfikacji jedynie niezgodności o mniejszym znaczeniu, podczas gdy krytyczne i poważne niezgodności zostały wyeliminowane we wcześniejszych fazach.



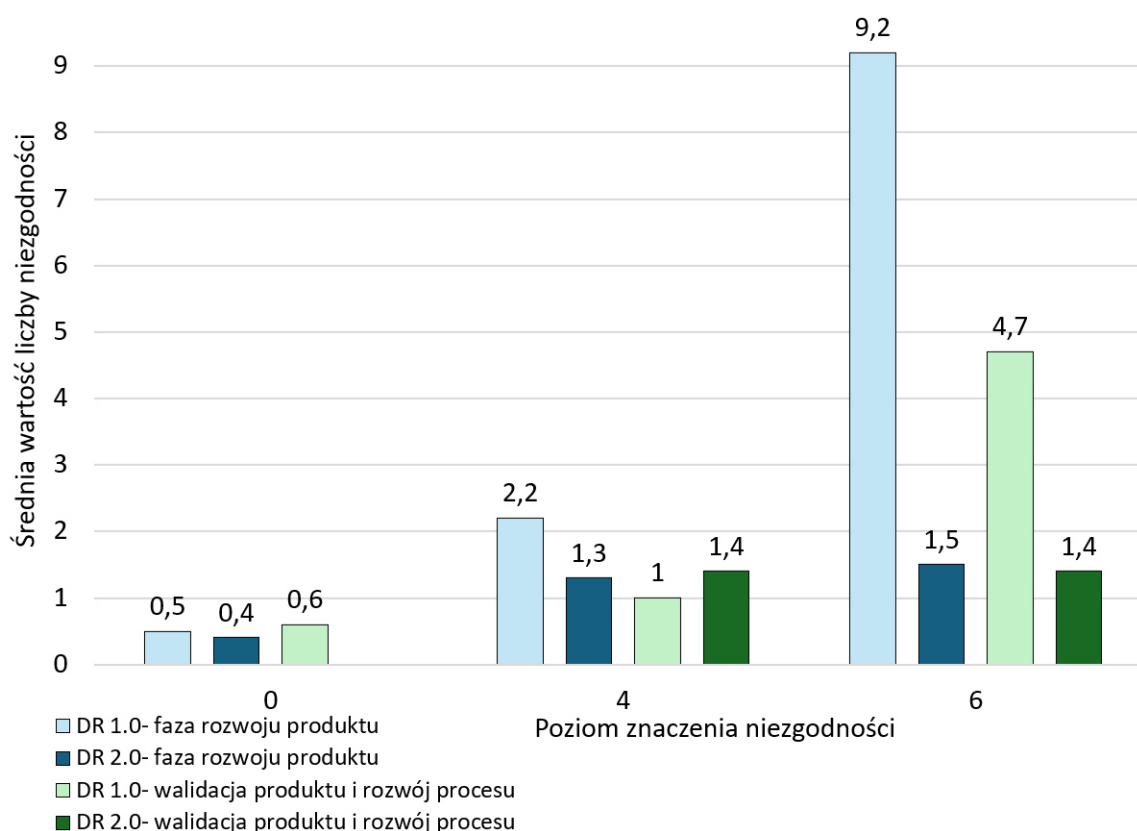
Rysunek 4.1.3. Średnia wartość liczby niezgodności według poziomu znaczenia i fazy projektu – porównanie walidacji i pełnego wdrożenia DR 1.0 (opracowanie własne)

Pełne wdrożenie DR 1.0 doprowadziło do przesunięcia wykrywalności niezgodności z fazy walidacji produktu i rozwoju procesu do fazy rozwoju produktu. Jednocześnie ograniczono liczbę niezgodności krytycznych i poważnych, a większy udział stanowią niezgodności o znaczeniu średnim, które są łatwiejsze do wyeliminowania. Uzyskany w wyniku wdrożenia DR trend potwierdza, że doskonalenie i częstość użycia narzędzia zwiększyło jego skuteczność i pozwolił na wcześniejsze oraz bardziej skuteczne ograniczenie ryzyka wystąpienia niezgodności w późnych fazach planowania jakości.

W celu porównania wyników dla wdrożenia DR 1.0 i DR 2.0, konieczne było skonsolidowanie wartości dla poziomów znaczenia 6 i 8 w DR 1.0 tak, aby odpowiadały one strukturze poziomów niezgodności stosowanej w DR 2.0. Zgodnie z kryteriami klasyfikacji przedstawionymi w tabeli 3.7.2.3, w DR 2.0 wprowadzono uproszczoną ocenę, w której poziomy znaczenia 6 i 8 zostały połączone w jedną kategorię.

Wykres (rys. 4.1.4) przedstawia porównanie poziomów niezgodności dla wybranych faz dla DR 1.0 i DR 2.0. w fazie rozwoju produktu uzyskano zmiany – w DR 1.0 dominowały niezgodności na poziomie znaczenia 6, których średnia wartość wynosiła 9,2. Po wdrożeniu DR 2.0 liczba niezgodności na tym samym poziomie znaczenia spadła do 1,5. Równocześnie wartość na poziomie znaczenia 4 obniżyła się z 2,2 do 1,3. Tak silna redukcja liczby niezgodności wskazuje, na znaczenie bardziej szczegółowej analizy w DR 2.0, w wyniku czego większość niezgodności zostało zidentyfikowanych na wcześniejszych fazach, co znacząco zmniejszyło ryzyko eskalacji w dalszej realizacji projektu.

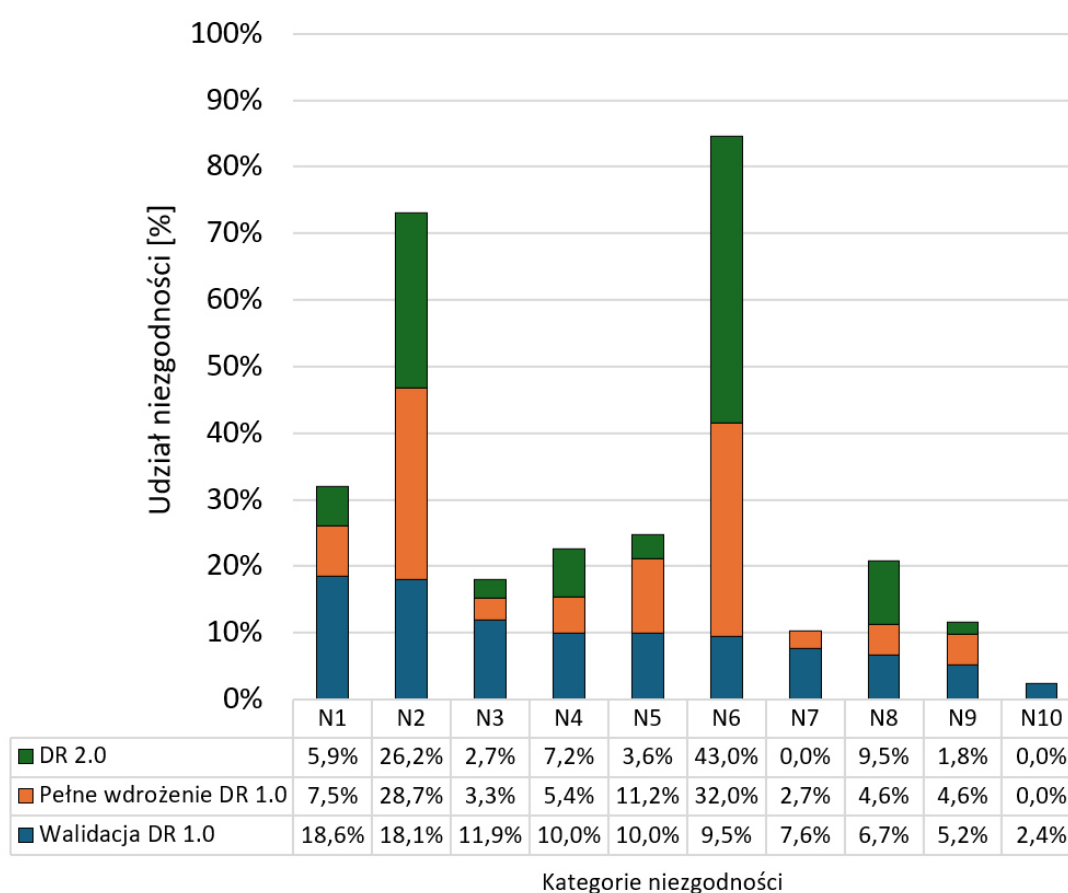
W fazie walidacji produktu i rozwoju procesu w DR 1.0 odnotowano średnio 4,7 niezgodności na poziomie znaczenia 6. w DR 2.0 wartość ta spadła do 1,4. Jednocześnie liczba niezgodności na poziomie znaczenia 4 wzrosła z 1,0 do 1,4, co oznacza, że w fazie walidacji produktu i rozwoju procesu zidentyfikowano głównie niezgodności średniego znaczenia, podczas gdy poważne i krytyczne niezgodności zostały zidentyfikowane w fazie rozwoju produktu.



Rysunek 4.1.4. Średnia wartość liczby niezgodności według poziomu znaczenia i fazy projektu – porównanie DR 1.0 i DR 2.0 (opracowanie własne)

Porównanie etapu wdrożenia DR 1.0 i DR 2.0 wykazuje, że rozwój DR doprowadził do istotnej redukcji liczby niezgodności na poziomie znaczenia 6 – z 9,2 do 1,5 w fazie rozwoju produktu oraz z 4,7 do 1,4 w fazie walidacji produktu i rozwoju procesu. Równocześnie nieznacznie wzrosła liczba niezgodności o znaczeniu średnim (poziom 4) w fazie walidacji produktu i rozwoju procesu – z 1,0 do 1,4. Oznacza to, że wdrożenie DR 2.0 pozwoliło na przesunięcie wykrywalność niezgodności w stronę wcześniejszych faz planowania jakości, eliminując niezgodności poważne i krytyczne, a w fazie walidacji produktu i rozwoju procesu ujawniając niezgodności o mniejszym znaczeniu.

Na wykresie (rys. 4.1.5) przedstawiono procentowy udział poszczególnych kategorii niezgodności (N1–N10) w kolejnych etapach wdrożenia Design Review: walidacji DR 1.0, pełnym wdrożeniu DR 1.0 oraz DR 2.0.



Rysunek 4.1.5 Udział procentowy niezgodności w poszczególnych etapach wdrażania Design Review z podziałem na kategorie N1–N10

W fazie walidacji DR 1.0 rozkład niezgodności był stosunkowo równomierny – największe udziały miały kategorie N1 (niezgodność w BOM lub danych materiałowych) – 18,6%, N2 (niezgodność ze standardami CAD) – 18,1%, N3 (niezgodne oznaczenie charakterystyki specjalnej) – 11,9%, N4 (niezgodność specyfikacji z rysunkiem klienta) – 10,0%, a także N5 (błędne założenia i ograniczenia konstrukcyjne) – 10,0% oraz N6 (brak danych technicznych na

rysunku) – 9,5%. Uzyskane dane wskazują, że niezgodności występowały w wielu kategoriach równocześnie, a działania naprawcze nie były jeszcze skoncentrowane na kluczowych źródłach ryzyka.

W pełnym wdrożeniu DR 1.0 zaczęły wyraźnie dominować dwie kategorie: N2 – 28,7% oraz N6 (brak danych technicznych na rysunku) – 32,0%. Oznacza to, że narzędzie pozwoliło skuteczniej zidentyfikować niezgodności krytyczne związane ze zgodnością dokumentacji CAD oraz kompletnością danych technicznych. Pozostałe kategorie niezgodności charakteryzowały się niższym udziałem (poniżej 10%).

Największe zmiany zaobserwowano w DR 2.0. Kategoria niezgodności N6 osiągnęła udział 43,0%, a N2 – 26,2%. Razem odpowiadają one za blisko 70% wszystkich niezgodności. Pozostałe kategorie niezgodności, w tym N1 (5,9%) czy N3 (2,7%), uległy znacznemu ograniczeniu.

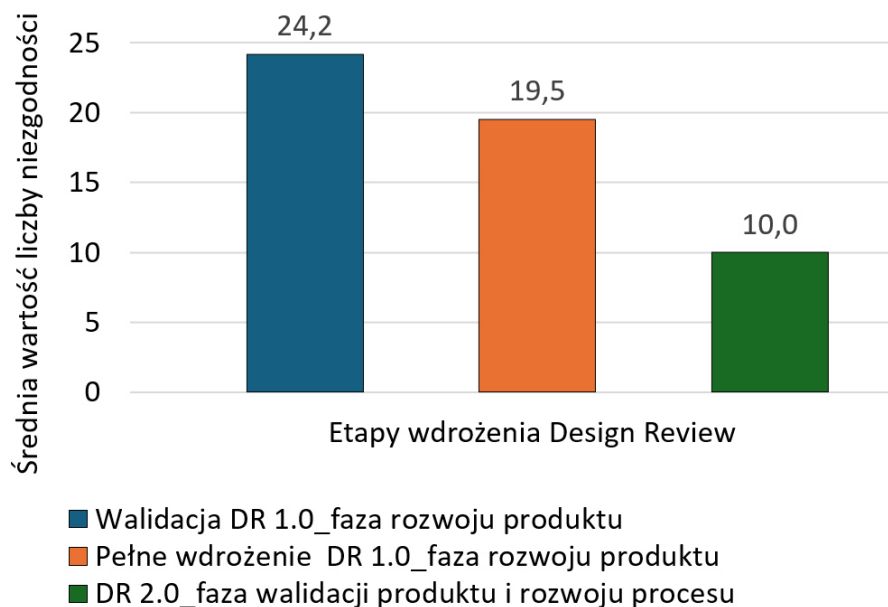
Porównanie etapów wdrożenia wykazało, że Design Review w wersji 2.0 pozwoliło na koncentrację wykrywalności w kategoriach niezgodności N2 (niezgodność ze standardami CAD) i N6 (brak danych technicznych na rysunku). Udział tych dwóch kategorii niezgodności wzrósł z 46,8% w pełnym DR 1.0 do 69,2% w DR 2.0, podczas gdy udział niezgodności w innych kategoriach niezgodności został zmniejszony. Takie przesunięcie wskazuje, że proces planowania jakości stał się bardziej ukierunkowany, a działania korygujące i zapobiegawcze mogą być precyzyjnie adresowane do kluczowych źródeł ryzyka.

W celu oceny skuteczności narzędzia i sprawdzenia, czy ponowna weryfikacja projektów w kolejnej fazie APQP przynosi wymierne różnice, konieczne było wskazanie odpowiednich etapów do porównań. Do analizy porównawczej wybrano wyniki z etapów: walidacji DR 1.0, pełnego wdrożenia DR 1.0 w fazie rozwoju produktu oraz DR 2.0 w fazie walidacji produktu i rozwoju procesu. Taki dobór jest uzasadniony, ponieważ projekty analizowane w DR 2.0 były wcześniej sprawdzane już w fazie rozwoju produktu z wykorzystaniem DR 1.0. Dzięki temu możliwe jest nie tylko porównanie obu wersji narzędzia, ale także obiektywna ocena, w jakim stopniu ponowne sprawdzenie w kolejnej fazie APQP pozwoliło na ograniczenie liczby i wagi niezgodności oraz potwierdzenie skuteczności zastosowanych działań.

Na wykresie (rys. 4.1.6) przedstawiono średnią wartość liczby niezgodności dla projektów analizowanych w różnych etapach wdrożenia Design Review. w fazie walidacji DR 1.0 odnotowano średnio 24,2 niezgodności, w pełnym wdrożeniu DR 1.0 liczba ta spadła do 19,5, a w DR 2.0 osiągnęła wartość 10,0.

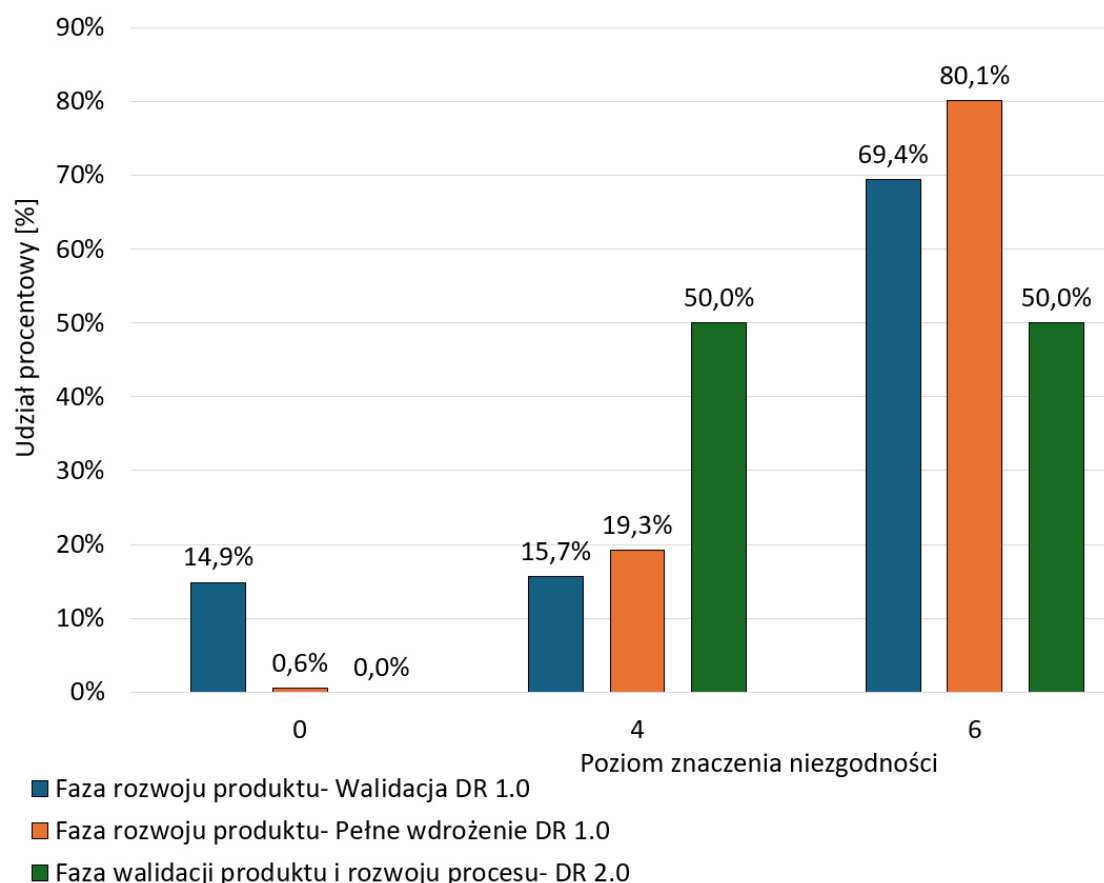
Tak wyraźna różnica wskazuje, że projekty weryfikowane w etapie wdrożenia DR 2.0 miały znacznie mniejszą liczbę niezgodności, ponieważ były wcześniej weryfikowane już na etapie rozwoju produktu z wykorzystaniem DR 1.0. Oznacza to, że wdrożenie narzędzia DR skutecznie ograniczyło powtarzalność niezgodności w kolejnych fazach planowania jakości.

Wdrożenie DR 2.0 przyniosło redukcję średniej wartości liczby niezgodności o 14,2 w stosunku do walidacji DR 1.0 oraz o 9,5 względem pełnego wdrożenia DR 1.0. Uzyskany wynik potwierdza skuteczność wdrożenia narzędzia w zakresie zmniejszania ilości niezgodności.



Rysunek 4.1.6. Średnia wartość liczby niezgodności w projektach dla poszczególnych etapów wdrożenia Design Review (opracowanie własne)

Na wykresie (rys. 4.1.7) przedstawiono udział procentowy średniej liczby niezgodności przypisanych do poziomów znaczenia 0, 4 i 6 dla trzech etapów wdrożenia Design Review: walidacji DR 1.0, pełnego wdrożenia DR 1.0 oraz DR 2.0 (w fazie walidacji produktu i rozwoju procesu). w celu umożliwienia porównania wyników dla wdrożenia DR 1.0 i DR 2.0, poziomy znaczenia 6 i 8 w DR 1.0 zostały skonsolidowane, tak aby odpowiadały uproszczonej klasyfikacji stosowanej w DR 2.0.



Rysunek 4.1.7. Udział procentowy średniej liczby niezgodności według poziomu w projektach analizowanych w poszczególnych etapach wdrożenia Design Review (opracowanie własne)

Dla fazy walidacji produktu i rozwoju procesu DR 1.0 zidentyfikowało niezgodności krytyczne na poziomie znaczenia 0, które stanowiły 14,9% wszystkich przypadków. Na etapie pełnego wdrożenia DR 1.0 ich udział spadł do wartości 0,6%, a w DR 2.0 został całkowicie wyeliminowany (0,0%). Oznacza to, że narzędzie DR w wdrożonej postaci 2.0 skutecznie diagnozuje niezgodności o charakterze krytycznym w procesie planowania jakości w fazie rozwoju produktu.

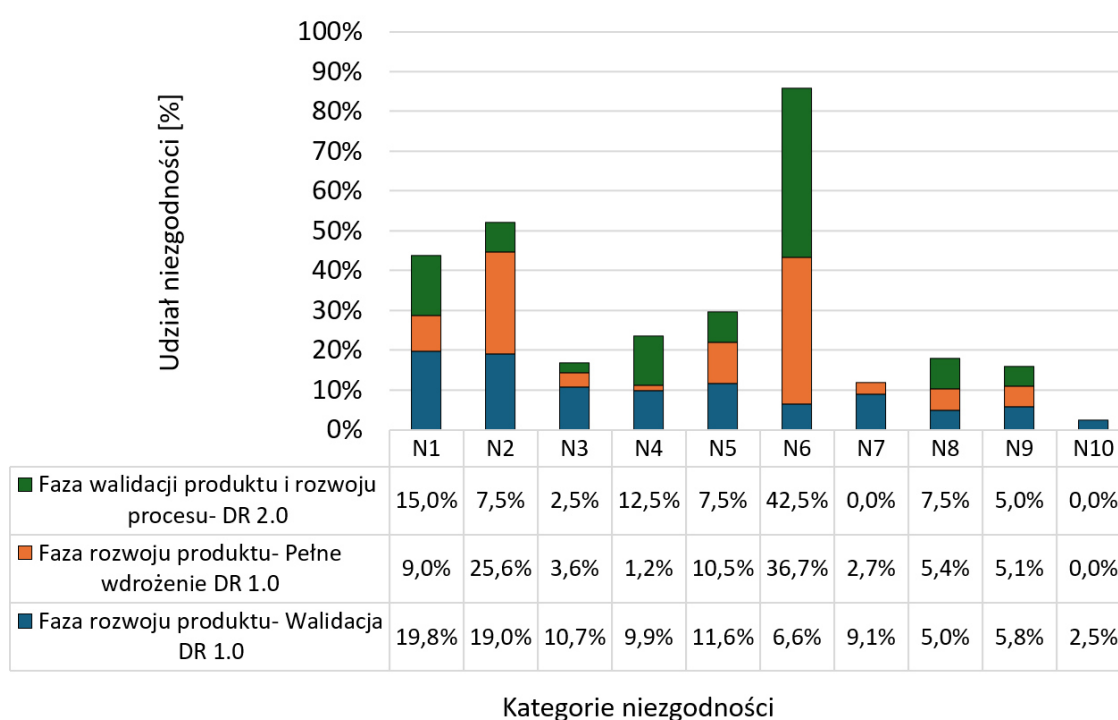
Równocześnie zdefiniowano przesunięcie wykrywalności niezgodności w zakres kategorii niezgodności średniego znaczenia (4). Dla etapu walidacji DR 1.0 udział niezgodności z poziomu znaczenia 4 wynosił 15,7%, w pełnym DR 1.0 wzrósł do wartości 19,3%, a w DR 2.0 osiągnął wartość 50,0%. Uzyskaną zmianę należy interpretować jako pozytywną co oznacza, że w fazie walidacji produktu i rozwoju procesu pozostają przede wszystkim niezgodności o niższym poziomie znaczenia.

Największy udział w DR 1.0 miały niezgodności na poziomie znaczenia 6 i 8 (skonsolidowane) – 69,4% w fazie walidacji produktu i rozwoju procesu i aż 80,1% w pełnym wdrożeniu. Na etapie wdrożenia DR 2.0 udział niezgodności dla poziomu znaczenia 6 obniżył się do 50,0%.

Spadek wartości potwierdza, że narzędzie DR ograniczyło liczbę niezgodności o znaczeniu 6, wykrywając je we wcześniejszych fazach planowania jakości.

Porównanie etapów wdrożenia DR wykazało wyraźną poprawę skuteczności użycia narzędzia. Udział niezgodności krytycznych na poziomie znaczenia 0 obniżył się z 14,9% w etapie walidacji DR 1.0 do wartości 0% w DR 2.0. Jednocześnie zwiększył się udział niezgodności o poziomie znaczenia 4, a zmniejszył się udział niezgodności o poziomie znaczenia 6 i 8. Oznacza to, że na etapie DR 2.0 faza walidacja produktu i rozwój procesu pełni rolę potwierdzającą status qwo spełnienia wymagań. Takie przesunięcie dowodzi, że narzędzie DR skutecznie poprawiło zarówno jakość dokumentacji technicznej, jak i skuteczność procesu rozwoju i industrializacji.

Na wykresie (rys. 4.1.8) przedstawiono udział procentowy niezgodności w kategoriach N1–N10 na etapie walidacji DR 1.0, pełnym wdrożeniu DR 1.0 oraz w DR 2.0 (faza walidacji produktu i rozwoju procesu).



Rysunek 4.1.8 Udział procentowy niezgodności w poszczególnych kategoriach dla etapów wdrożenia Design Review (N1–N10) (opracowanie własne)

Na etapie walidacji DR 1.0 udział poszczególnych niezgodności był rozproszony – największe udziały miały N1 (niezgodność w BOM lub danych materiałowych) – 19,8%, N2 (niezgodność ze standardami CAD) – 19,0%, N3 (niezgodne oznaczenie charakterystyki specjalnej) – 10,7%, N4 (niezgodność specyfikacji z rysunkiem klienta) – 9,9%, N5 (błędne założenia i ograniczenia konstrukcyjne) – 11,6% oraz N7 (niekontrolowane kopiowanie dokumentacji) – 9,1%. Pojawiły się także indywidualne przypadki niezgodności (N10 – 2,5%).

W pełnym wdrożeniu DR 1.0 nastąpiła wyraźna koncentracja na kategoriach N2 (25,6%) i N6 (36,7%). Jednocześnie część kategorii znacząco spadła – np. N1 do 9,0%, N3 do 3,6%, a N7 do 2,7%. N10 zostało całkowicie wyeliminowane (0,0%).

W DR 2.0 głównym źródłem niezgodności stała się kategoria N6 (42,5%), a kolejne miejsca zajęły N1 (15,0%) i N4 (12,5%). Udział N2 spadł do 7,5%, co wskazuje, że problemy związane ze standardami CAD zostały w dużej mierze ograniczone. Co istotne – w DR 2.0 całkowicie zanikły niezgodności N7 i N10.

Trendy zmian

- **Kategorie rosnące:** N4 (z 9,9% do 12,5%), N6 (z 36,7% do 42,5%).
- **Kategorie malejące:** N1 (z 19,8% do 15,0%), N2 (z 25,6% do 7,5%), N3 (z 10,7% do 2,5%), N5 (z 11,6% do 7,5%), N7 (z 9,1% do 0,0%), N10 (z 2,5% do 0,0%).
- **Stabilne z niewielkimi zmianami:** N8 i N9 utrzymują się na poziomie 5–7% bez istotnych wahań.

W kilku kategoriach można zauważyć zjawisko, w którym udział niezgodności w fazie walidacji DR 1.0 osiąga określony poziom, następnie maleje podczas pełnego wdrożenia DR 1.0, a w DR 2.0 ponownie rośnie. Dotyczy to m.in. N1 (BOM), N4 (specyfikacja z rysunkiem klienta), N5 (ograniczenia konstrukcyjne), N8 (parametry konstrukcyjne) oraz N9 (BOM z modelem CAD). Pokazuje to, że DR 2.0 ma większą zdolność do wychwytywania niezgodności w obszarach, które w pełnym DR 1.0 były częściowo pomijane lub uznawane za mniej istotne.

Możliwe wyjaśnienia ponownego wzrostu udziału niektórych kategorii w DR 2.0 obejmują:

- **Niewłaściwe lub powierzchowne działania korygujące i zapobiegawcze** po DR 1.0, które nie usuwały przyczyn źródłowych, lecz jedynie skutki.
- **Szerszy zakres analizy w DR 2.0**, dzięki któremu wykryto przypadki wcześniej pomijane lub niedostrzegane.
- **Niewłaściwe sklasyfikowanie niezgodności** może skutkować wdrożeniem nieskutecznych akcji korekcyjnych i zapobiegawczych.

W etapie walidacji DR 1.0 niezgodności były rozproszone w wielu kategoriach, w etapie pełnego wdrożenia DR 1.0 dominowały N2 (CAD) i N6 (brak danych technicznych), a w DR 2.0 głównym źródłem pozostała jedna kategoria – N6, odpowiadająca za 42,5% wszystkich przypadków. Jednocześnie wyeliminowano N7 i N10, a udział N2 został znacząco zredukowany. Oznacza to, że narzędzie skutecznie ograniczyło rozproszone i incydentalne niezgodności, koncentrując działania na obszarach najbardziej krytycznych dla jakości dokumentacji i stabilności procesu.

4.2. Ocena skuteczności wdrożenia Problem Definition Tool

Problem Definition Tool wdrożono w celu ujednolicenia sposobu opisu i prezentacji niezgodności. Dotychczas w przedsiębiorstwie stosowano różne formy zapisu dotyczące prezentacji niezgodności, co utrudniało analizę i prowadziło do niepotrzebnych eskalacji. Opracowanie PDT warunkuj, że każda niezgodność jest przedstawiana w spójny sposób, co usprawnia komunikację i podejmowanie decyzji. PDT nie służy bezpośrednio do rozwiązywania niezgodności, lecz do ich skutecznego prezentowania danych i informacji o niezgodności. Poniżej przedstawiono analizę wyników badań dotyczących oceny skuteczności zastosowania PDT w procesie planowania jakości produktu i procesu, na podstawie porównania dwóch grup: niezgodności trwale usuniętych (Tabela 4.2.1) oraz tych, które powtórnie wystąpiły przed upływem 24 miesięcy (Tabela 4.2.2).

Tabela 4.2.1. Wartości średnie i odchylenia standardowe wskaźników oceny skuteczności narzędzia Problem Definition Tool (PDT) dla niezgodności trwale usuniętych (opracowanie własne)

LICZBA ITERACJI		WARTOŚĆ RPN	
Średnia wartość liczby iteracji	Odchylenie standardowe dla liczby iteracji	Średnia wartość wskaźnika RPN	Odchylenie standardowe dla wskaźnika RPN
3,6	1,6	180,4	85,4

KOMPLETNOŚĆ WYPEŁNIENIA FORMULARZA			WARTOŚĆ SEVERITY	
Średnia wartość kompletności wypełnienia formularza PDT	Średnia kompletność wypełnienia formularza PDT [%]	Odchylenie standardowe dla kompletności wypełnienia formularza PDT	Średnia wartość liczby kryterialnej Severity	Odchylenie standardowe dla liczby kryterialnej Severity
6,5	92,9%	0,8	7,0	1,5

Tabela 4.2.2. Wartości średnie i odchylenia standardowe wskaźników oceny skuteczności narzędzia Problem Definition Tool (PDT) dla niezgodności, które powtórnie wystąpiły przed upływem 24 miesięcy (opracowanie własne)

LICZBA ITERACJI		WARTOŚĆ RPN	
Średnia wartość liczby iteracji	Odchylenie standardowe dla liczby iteracji	Średnia wartość wskaźnika RPN	Odchylenie standardowe dla wskaźnika RPN
2,8	0,4	150,4	86,7

KOMPLETNOŚĆ WYPEŁNIENIA FORMULARZA			WARTOŚĆ SEVERITY	
Średnia wartość kompletności wypełnienia formularza PDT	Średnia kompletność wypełnienia formularza PDT [%]	Odchylenie standardowe dla kompletności wypełnienia formularza PDT	Średnia wartość liczby kryterialnej Severity	Odchylenie standardowe dla liczby kryterialnej Severity
5,4	77,1%	0,9	4,8	1,3

Zestawienie wyników analiz zawartych w tabelach (4.2.1 i 4.2.2) pozwala ocenić skuteczność wykorzystania PDT, co stanowi podstawę do dalszej analizy porównawczej i wyciągnięcia wniosków dotyczących skuteczności stosowania formularza PDT w procesie planowania jakości w zakresie eliminacji niezgodności.

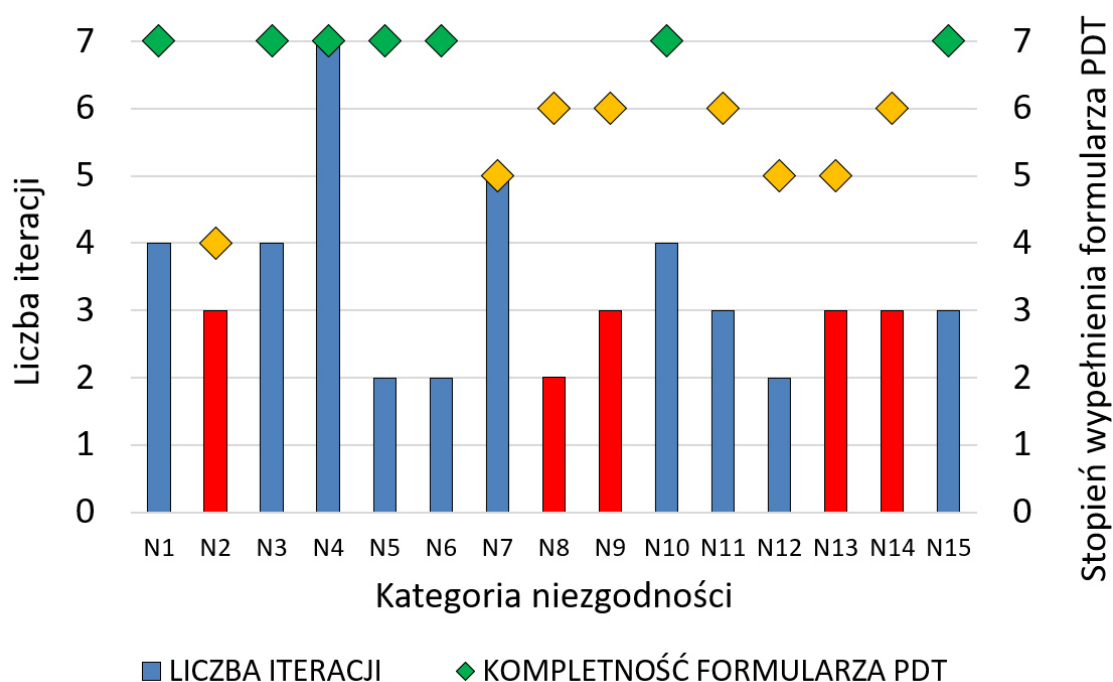
Porównanie wyników zawartych w tabelach 4.2.1 i 4.2.2 pozwala wykazać różnice w zakresie analizy niezgodności pomiędzy trwale usuniętymi, a tymi, które w badanym okresie wystąpiły ponownie.

Średnia wartość liczby iteracji użycia PDT była wyższa w przypadku niezgodności trwale usuniętych (3,6) niż występujących ponownie (2,8). Sugeruje to, że wielokrotna prezentacja w PDT oraz dokładniejsza analiza pozwala na właściwe zrozumienie jego przyczyn i skuteczniejsze podjęcie działań korygujących (doskonalących).

Wyraźne różnice dotyczą także kompletności wypełnienia formularza. Trwale usunięte niezgodności charakteryzuje średnia wartość wypełnienia wynosząca 6,5 (92,9%), a powtórne niezgodności 5,4 (77,1%). Braki danych i informacji w formularzu PDT utrudniają pełne zrozumienie analizowanych niezgodności i mogą wpływać na charakter działań naprawczych nie obejmując wszystkich aspektów niezgodności.

Niezgodności ocenione jako istotniejsze dla których liczba kryterialna Severity wynosiła średnio 7,0 a wskaźnik RPN 180,4, charakteryzowały większym stopniem wypełnienia formularza PDT wynoszącym 92,9% i skutecznością eliminacji niezgodności. Natomiast niezgodności charakteryzujące się niższą wartością liczby kryterialnej Severity wynoszącą 4,8, a wskaźnik RPN 150,4 ponownie występowały, co wskazuje, że nie były analizowane z wystarczającą szczegółowością wynikającą z braku kompletności danych i informacji.

Na wykresie (rys.4.2.1) przedstawiono zależność liczby iteracji oraz stopnia wypełnienia formularza PDT w podziale na poszczególne kategorie niezgodności. Kolumny wykresu w kolorze czerwonym oznaczają niezgodności, które wystąpiły ponownie w okresie 24 miesięcy, zielony kolor znaczników znaczy pełne uzupełnienie formularza PDT.



Rysunek 4.2.1 Zależność liczby iteracji od stopnia wypełnienia formularza PDT w poszczególnych kategoriach niezgodności- kolor niebieski niezgodności trwale wyeliminowane, kolor czerwony oznacza niezgodności występujące powtórnie (opracowanie własne)

Zestawienie danych (rys 4.2.1) pozwala zaobserwować, że niezgodności oznaczone kolorem czerwonym (N2, N8, N9, N13, N14) charakteryzowały się niższą liczbą iteracji wykorzystanie formularza– zwykle 2–3 oraz niższym poziomem kompletności formularza (5–6). Oznacza to, że niezgodności były dokumentowane i prezentowane w sposób mniej szczegółowy.

Z kolei w niezgodnościach, w których formularz PDT został uzupełniony w pełnym zakresie (wartość 7), a liczba iteracji była wyższa (np. N3, N4, N6, N10), niezgodności nie wystąpiły ponownie. Świadczy to o tym, że kompletność wypełnienia formularza i wielokrotność iteracji spotkań zespołu sprzyja ich trwałej eliminacji.

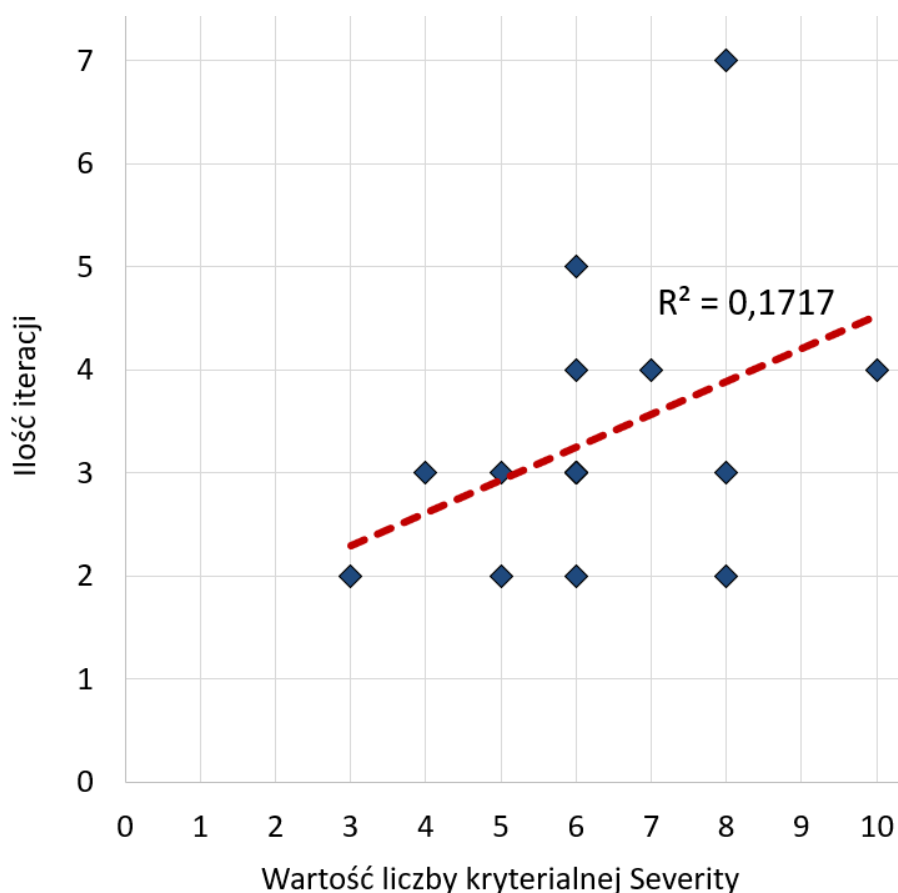
Przeprowadzona analiza danych wskazuje na wyraźny podział niezgodności. Niezgodności, które nie wystąpiły powtórnie (np. N1, N3, N4, N5, N6, N10, N11), charakteryzowały się wysoką kompletnością wypełnienia formularza PDT (najczęściej 6–7) i w większości przypadków większą liczbą iteracji spotkań zespołu. Natomiast niezgodności, które wystąpiły powtórnie (N2, N7, N8, N9, N12–N15) charakteryzowały się mniejszą liczbą iteracji oraz niepełnym uzupełnieniem formularza.

Powyższe pozwala stwierdzić, że kluczowe znaczenie dla skuteczności rozwiązywania problemów jakościowych ma kompletność danych i informacji ujętych w formularzu PDT. Dla niezgodności dla których formularz PDT charakteryzował się pełniejszym wypełnieniem i większą ilością iteracji, skuteczność podjętych decyzji dotyczących eliminacji przyczyn

niezgodności była wyższa, co potwierdza brak powtórnego wystąpienia niezgodności w okresie prowadzenia badań.

Na wykresie (rys. 4.2.2) przedstawiono zależność pomiędzy liczbą iteracji a wartością liczby kryterialnej Severity dla analizowanych niezgodności. Rozrzut punktów mieści się w przedziałach od 2 do 4 dla liczby iteracji oraz 4 do 8 dla liczby kryterialnej Severity. Uzyskana linia trendu o współczynniku determinacji $R^2 = 0,1717$ wskazuje, że zależność pomiędzy zmiennymi jest słaba, ale zauważalna – wraz ze wzrostem liczby iteracji średnia liczba wartość liczby kryterialnej Severity ma tendencję do wzrostu.

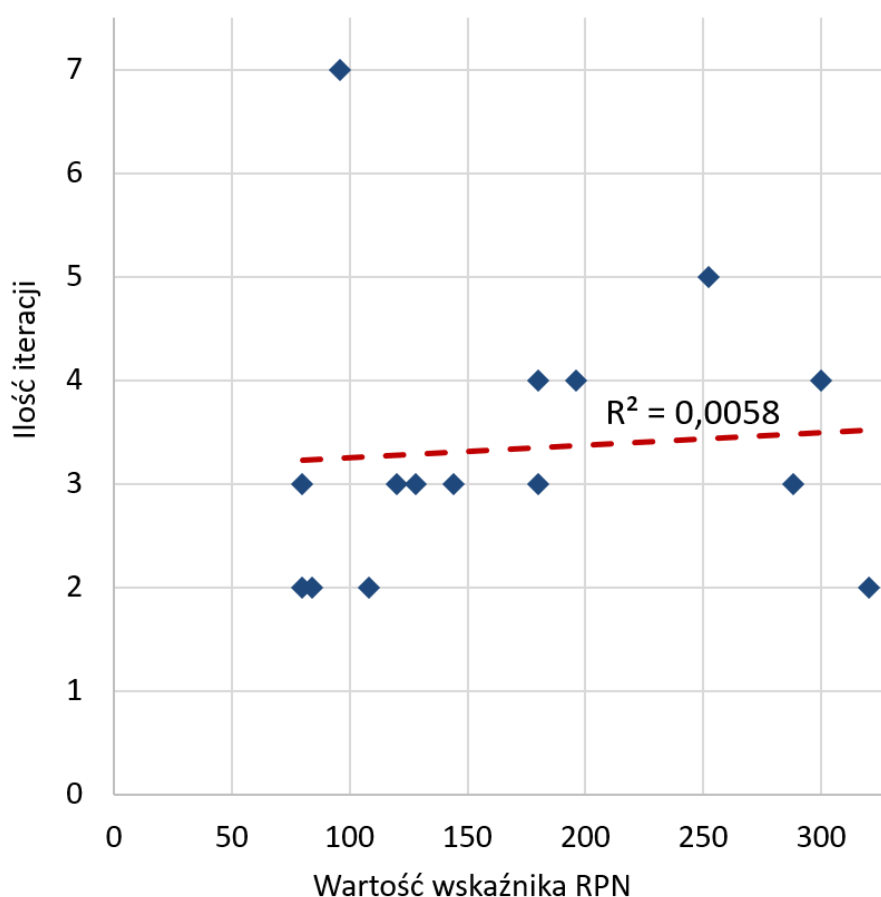
Powyższe pozwala uznać, że większa liczba powtórzeń iteracji może częściowo wiązać się z wyższym poziomem istotności analizowanych niezgodności, które wymagają zebrania odpowiednich i kompletnych danych i informacji. Jednocześnie niska wartość współczynnika R^2 sugeruje, że wartość liczby kryterialnej Severity stanowi niewielką część zmienności mającej wpływ na wartość liczby iteracji, a na ostateczny rezultat eliminacji niezgodności zależy od innych czynników (np. kompletność danych w formularzu, doświadczenie zespołu projektowego czy rodzaj analizowanej kategorii niezgodności).



Rysunek 4.2.2. Zależność pomiędzy liczbą iteracji a wartością liczby kryterialnej Severity, dla wszystkich analizowanych niezgodności (opracowanie własne)

Na wykresie (rys. 4.2.3) przedstawiono zależność pomiędzy liczbą iteracji a wartością wskaźnika RPN. Rozrzut punktów mieści się w przedziałach od 80 do 320 dla wartości wskaźnika RPN, przy czym największe skupienie występuje w obszarze 2–4 iteracji.

Linia trendu charakteryzuje się niskim współczynnikiem determinacji $R^2 = 0,0058$, co wskazuje na brak korelacji pomiędzy badanymi zmiennymi. Oznacza to, wartość wskaźnika RPN nie wpływa, na liczbę iteracji.



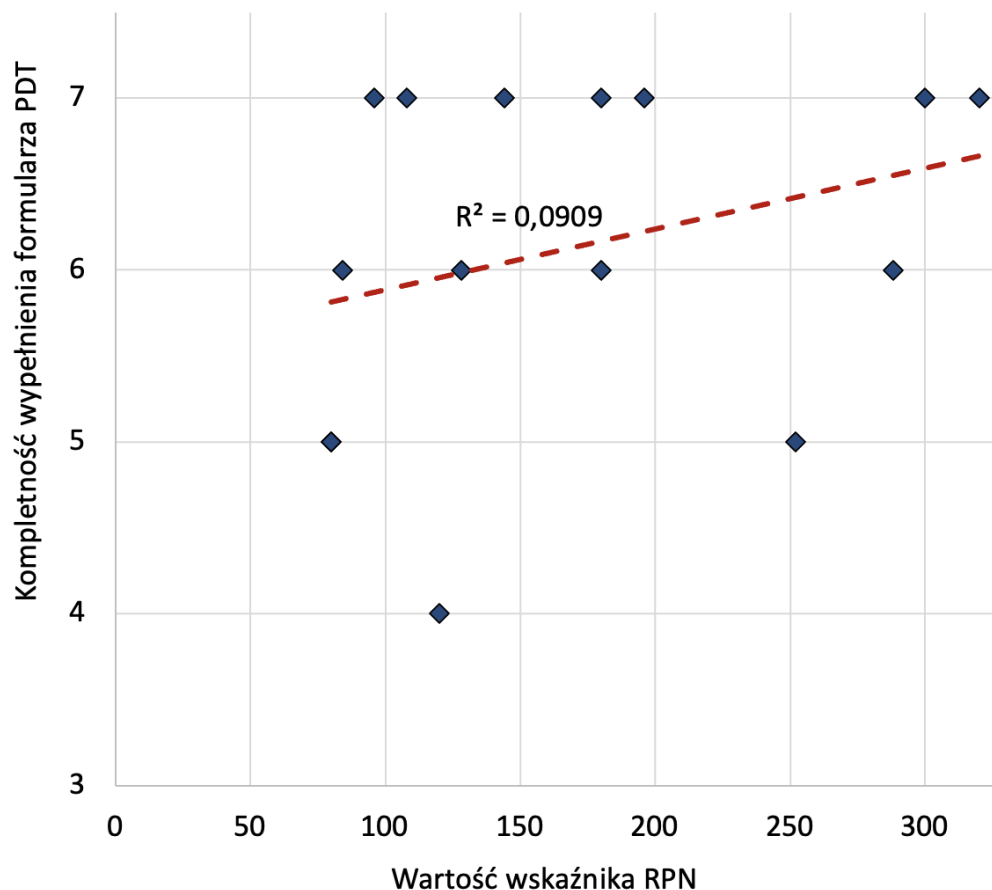
Rysunek 4.2.3. Zależność liczby iteracji od wartości wskaźnika RPN (opracowanie własne)

Na wykresie (rys. 4.2.4) przedstawiono zależność pomiędzy kompletnością wypełnienia formularza PDT a wartością wskaźnika RPN. Rozrzut punktów dla kompletności wypełnienia formularza mieści się w przedziałach od 4 do 7, wartość wskaźnika RPN od 80 do 320.

Dla różnych wartości RPN, np. 120 i 320 kompletność wypełnienia formularza PDT, jest taka sama zaobserwowana na poziomie 7.

Linia trendu ma dodatnie nachylenie, co sugeruje, że w pewnych przypadkach wraz ze wzrostem wskaźnika RPN rośnie poziom kompletności wypełnienia formularza PDT. Jednak niski współczynnik determinacji $R^2 = 0,0909$ wskazuje na bardzo słabą korelację – tylko około 9% zmienności RPN można wytłumaczyć stopniem uzupełnienia formularza.

Interpretacja korelacji jest zbliżona do wniosków z poprzednich wykresów: wartość wskaźnika RPN nie determinuje poziomu kompletności wypełnienia formularza.



Rysunek 4.2.4. Kompletność wypełnienia formularza PDT od wartości wskaźnika RPN (opracowanie własne)

Analiza uzyskanych wyników wykazała, że skuteczność zastosowania formularza *Problem Definition Tool* w procesie definiowania przyczyn niezgodności w istotnym stopniu zależy od zebrania odpowiednich i kompletnych danych i informacji. Analizowane niezgodności, które zostały trwale wyeliminowane, charakteryzowały się większą liczbą iteracji (średnio 3,6) oraz wysokim poziomem kompletności formularza (92,9%). Dane zawarte w formularzu PDT były w większości kompletne i kilkakrotnie analizowane, co miało istotny wpływ na właściwe rozpoznanie przyczyn niezgodności oraz skuteczne określenie działań korygujących.

Odmienne rezultaty uzyskano w przypadku analizy niezgodności powtórnie występujących. Średnia wartość liczby iteracji wyniosła 2,8, a kompletność formularza wyniosła 77,1%. Brak kompletności formularza PDT utrudniał zrozumienie istoty niezgodności i prowadził do nieskutecznych działań korygujących, które nie usuwały przyczyn źródłowych niezgodności. Potwierdzają to także niższe wartości liczby kryterialnej Severity i wskaźnika RPN w tej grupie,

wskazujące, że niezgodności analizowane z mniejszą kompletnością częściej ulegały eskalacji w kolejnych etapach.

Interpretacja wykresów (Rys. 4.2.1–4.2.4) potwierdza te wnioski. Wykazano umiarkowaną zależność pomiędzy liczbą iteracji a wartością wskaźnika Severity, natomiast w przypadku wartości RPN korelacja była znikoma. Podobnie kompletność formularza nie determinowała jednoznacznie poziomu ryzyka, jednak w praktyce pełniejsze i bardziej szczegółowe zapisy sprzyjały eliminacji powtarzalnych niezgodności.

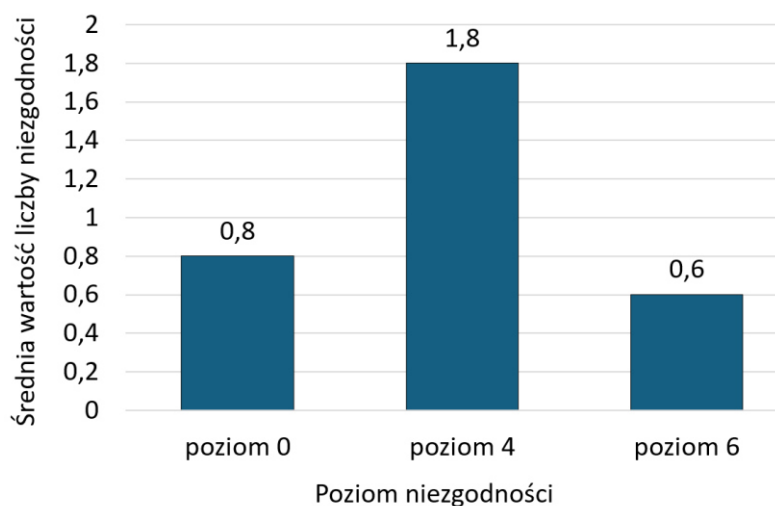
Podsumowując, skuteczność PDT wynikała przede wszystkim z rzetelności i konsekwencji jego stosowania. w przypadkach, w których formularz był wypełniony dokładnie i omawiany wielokrotnie, niezgodności były trwale eliminowane. Natomiast uproszczone i niepełne zapisy zwiększały prawdopodobieństwo powrotu problemów w kolejnych etapach realizacji projektu lub w innych projektach.

4.3. Ocena skuteczności wdrożenia Technical Review

Technical Review zostało opracowane jako narzędzie do uporządkowanej oceny danych technicznych oraz potwierdzenia zgodności projektu z wymaganiami klienta i możliwościami procesu produkcyjnego. Jego głównym celem zastosowania w praktyce inżynierskiej jest wczesna identyfikacja ryzyk i ograniczenie liczby niezgodności mogących ujawnić się w późnych fazach planowania jakości. Zaproponowane narzędzie ma pełnić rolę tzw. jakościowej bramki w procesie APQP/Ten PLUS, wspierając podjęcie decyzji o przejściu do kolejnych faz planowania jakości. Niniejszy rozdział dotyczy oceny skuteczności zastosowania Technical Review w procesie rozwoju i industrializacji amortyzatorów, ze szczególnym uwzględnieniem jego roli w identyfikacji ryzyk oraz ograniczaniu potencjalnych niezgodności.

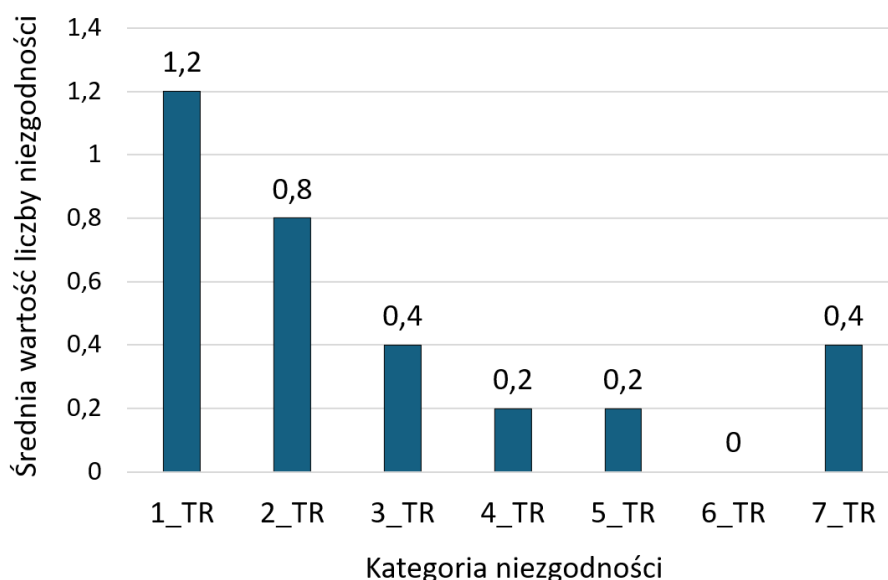
Analiza została podzielona na dwa etapy: walidacji oraz pełnego wdrożenia. w fazie walidacji przeanalizowano dane z pięciu projektów, które charakteryzowały się średnią wartością równą 3,2 niezgodności na projekt. Projekty te w momencie wdrożenia Technical Review znajdowały się w fazie walidacji produktu i rozwoju procesu, co pozwoliło na ocenę skuteczności zmodyfikowanego narzędzia w kontekście identyfikacji potencjalnych niezgodności przed przejściem do kolejnych fazy planowania jakości.

Wykres (Rysunek 4.3.1) przedstawia średnią wartość liczby niezgodności na poszczególnych poziomach znaczenia w etapie walidacji produktu i rozwoju procesu. w ramach Technical Review ujawniono w zakresie przeprowadzonych badań średnią wartość liczby niezgodności 1,8 dla poziomu znaczenia 4, średnia wartość liczby niezgodności 0,8 na poziomie znaczenia 0 oraz średnia wartość liczby niezgodności 0,6 na poziomie znaczenia 6. Wyniki te wskazują, że największy udział miały niezgodności o poważnym charakterze (poziom znaczenia 4), podczas gdy niezgodności krytyczne (poziom znaczenia 0) i o średnim wpływie (poziom znaczenia 6) występowały rzadziej.



Rysunek 4.3.1. Średnia wartość liczby niezgodności dla poszczególnych poziomów znaczenia niezgodności – etap walidowania instrumentu Technical Review (opracowanie własne)

Wykres (rys. 4.3.2) przedstawia średnią wartość liczby niezgodności dla poszczególnych kategorii w etapie walidacji produktu i rozwoju procesu. Najczęściej występowały niezgodności z kategorii 1_TR (1,2 na projekt) oraz 2_TR (0,8 na projekt). Kolejne kategorie charakteryzowały się już znacznie niższymi wartościami – dla 3_TR i 7_TR średnio 0,4, dla 4_TR i 5_TR po 0,2, natomiast w przypadku 6_TR nie odnotowano niezgodności.

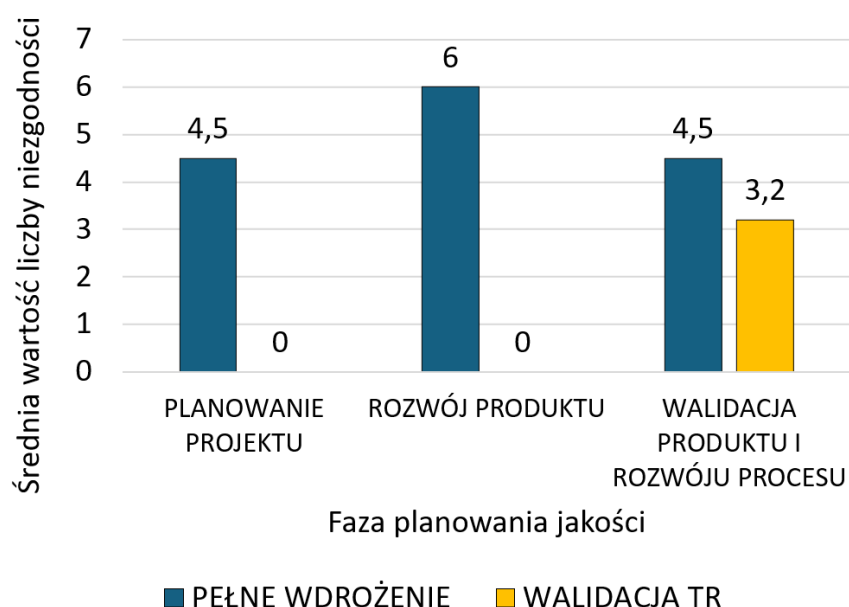


Rysunek 4.3.2. Średnia wartość liczby niezgodności dla poszczególnych kategorii niezgodności na etapie walidacji instrumentu Technical Review (opracowanie własne)

Podsumowując, w etapie walidacji produktu i rozwoju procesu dla kategorii 1_TR i 2_TR, uzyskały największą wartość średniej liczby niezgodności.

Na etapie pełnego wdrożenia instrumentu Technical Review przeprowadzono analizę obejmującą projekty realizowane w trzech fazach planowania jakości: planowanie projektu (2 projekty), rozwój produktu (5 projektów) oraz walidacja produktu i rozwoju procesu (4 projekty). Łącznie oceniono 11 projektów, co pozwoliło na określenie różnic w poziomie niezgodności pomiędzy poszczególnymi fazami planowania jakości oraz określenie, w jakim stopniu pełna implementacja TR wspiera identyfikację ryzyk i zapewnia zgodność konstrukcji produktu z wymaganiami.

Wykres (rys. 4.3.3) przedstawia średnią wartość liczby niezgodności na projekt z podziałem na fazę planowania jakości na etapie pełnego wdrożenia Technical Review, z odniesieniem do wyników uzyskanych podczas jego walidacji. Najwyższą wartość odnotowano w fazie rozwoju produktu – średnio 6 niezgodności na projekt. w fazie planowania projektu oraz w fazie walidacji produktu i rozwoju procesu zidentyfikowano średnio po 4,5 niezgodności na projekt.

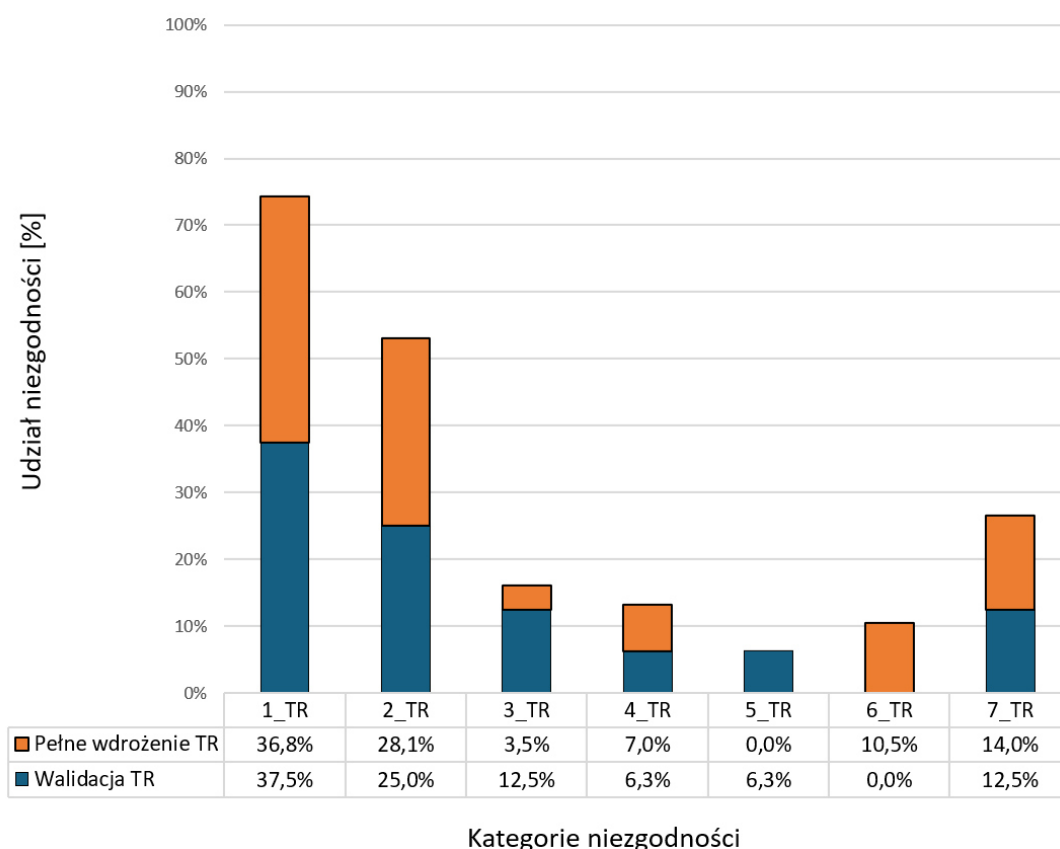


Rysunek 4.3.3. Średnia liczba niezgodności na projekt w poszczególnych fazach planowania jakości – porównanie etapu walidacji i pełnego wdrożenia Technical Review (opracowanie własne)

Porównanie z wcześniejszym etapem walidacji TR wykazało, że dla fazy walidacji produktu i rozwoju procesu liczba niezgodności wzrosła z 3,2 do 4,5 na projekt, co wskazuje na bardziej szczegółową i systematyczną identyfikację niezgodności po pełnym wdrożeniu TR w procesie planowania jakości.

Podsumowując, pełne wdrożenie Technical Review pozwoliło na skuteczniejsze wykrywanie niezgodności w procesie planowania jakości, obejmując fazy, które wcześniej nie były objęte analizą. Największą średnią wartość liczby niezgodności ujawniono w fazie rozwoju produktu co definiuje, iż jest to faza planowania jakości najbardziej narażona na wystąpienie niezgodności dla badanych projektów.

Wykres (rys. 4.3.4) przedstawia udział procentowy niezgodności w poszczególnych etapach wdrażania Technical Review z podziałem na kategorie niezgodności. Największy udział miały niezgodności z kategorii 1_TR – niezgodność w realizacji testów i walidacji, które stanowiły 36,8% w pełnym wdrożeniu oraz 37,5% w etapie walidacji TR. Drugą dominującą grupę stanowiła kategoria niezgodności 2_TR – niezgodność w dokumentacji projektowej i jakościowej, osiągając 28,1% w etapie pełnego wdrożenia oraz 25% w walidacji. Istotny udział miały również kategoria niezgodności 7_TR – niezgodność w procesach produkcyjnych i kontrolnych, które odpowiednio wyniosły 14% i 12,5%.



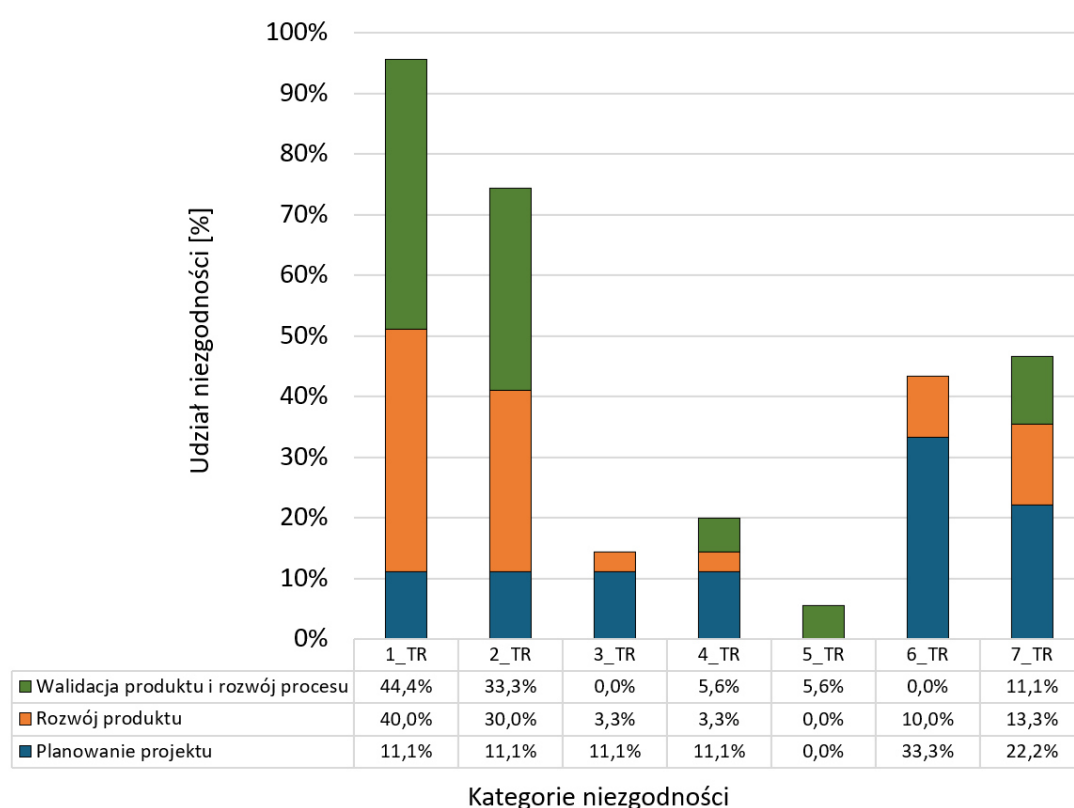
Rysunek 4.3.4. Udział procentowy niezgodności w poszczególnych kategoriach – porównanie etapu walidacji i pełnego wdrożenia Technical Review (opracowanie własne)

Pozostałe kategorie miały znacznie mniejsze znaczenie: dla 3_TR – niezgodność w strukturze BOM i oznaczeniach części odnotowano 3,5% w pełnym wdrożeniu oraz 12,5% w walidacji, dla 4_TR – niezgodność w danych technicznych komponentów wartości wyniosły 7% i 6,3%, a dla 5_TR – niezgodność w zarządzaniu wymaganiami dostawców pojawiła się wyłącznie w walidacji (6,3%). Warto także zwrócić uwagę na kategorię 6_TR – niezgodność z wymaganiami klienta, która wystąpiła jedynie w pełnym wdrożeniu i wyniosła 10,5%.

Podsumowując, zarówno na etapie walidacji, jak i w pełnym wdrożeniu, największy udział miały niezgodności 1_TR – niezgodność w realizacji testów i walidacji oraz 2_TR – niezgodność w dokumentacji projektowej i jakościowej. Trzecie miejsce zajęła kategoria 7_TR – niezgodność

w procesach produkcyjnych i kontrolnych, podczas gdy pozostałe kategorie odgrywały rolę uzupełniającą i nie przekraczały kilkunastu procent.

Wykres (rys 4.3.5) przedstawia udział procentowy niezgodności w poszczególnych fazach planowania jakości z podziałem na kategorie niezgodności w etapie pełnego wdrożenia Technical Review. Największy udział miały niezgodności z kategorii 1_TR – niezgodność w realizacji testów i walidacji, które występowały we wszystkich fazach: 44,4% w walidacji produktu i rozwoju procesu, 40% w rozwoju produktu oraz 11,1% w planowaniu projektu. Drugą dominującą kategorią były niezgodności 2_TR – niezgodność w dokumentacji projektowej i jakościowej, osiągając 33,3% w walidacji produktu i rozwoju procesu, 30% w rozwoju produktu i 11,1% w planowaniu projektu.



Rysunek 4.3.5. Udział procentowy niezgodności w poszczególnych fazach planowania jakości z podziałem na kategorie – etap pełnego wdrożenia Technical Review (opracowanie własne)

Znaczący udział miały także niezgodności 7_TR – niezgodność w procesach produkcyjnych i kontrolnych, których udział wyniósł 22,2% w planowaniu projektu, 13,3% w rozwoju produktu oraz 11,1% w walidacji produktu i rozwoju procesu. Pozostałe kategorie miały zdecydowanie mniejsze znaczenie – niezgodności 3_TR (struktura BOM i oznaczenia części) odnotowano w planowaniu projektu i rozwoju produktu na poziomie 11,1% i 3,3%, 4_TR (dane techniczne komponentów) w planowaniu projektu i walidacji produktu i rozwoju procesu – po 11,1% i 5,6%, a 5_TR (zarządzanie wymaganiami dostawców) pojawiły się wyłącznie

w walidacji (5,6%). Niezgodności 6_TR (zgodność z wymaganiami klienta) dotyczyły głównie planowania projektu (33,3%) i rozwoju produktu (10%).

Podsumowując, w pełnym wdrożeniu Technical Review dominowały trzy kategorie niezgodności: 1_TR, 2_TR oraz 7_TR (tabela 4.3.1). Pozostałe kategorie miały charakter uzupełniający i były rozproszone pomiędzy poszczególne fazy planowania jakości.

Tabela 4.3.1. Dominujące kategorie niezgodności w pełnym wdrożeniu Technical Review wraz z przykładowymi podkategoriami (opracowanie własne)

Oznaczenie kategorii niezgodności	Kategoria niezgodności	Podkategoria niezgodności
1_TR	Niezgodność w realizacji testów i walidacji	Brak ukończenia testów, brak danych wejściowych; Niespełnienie kryteriów korozyjnych czy wytrzymałościowych; Brak potwierdzenia spełnienia wymagań
2_TR	Niezgodność w dokumentacji projektowej i jakościowej	Brak aktualizacji DFMEA; Brak Design Review; Niekompletne plany walidacji
7_TR	Niezgodność w procesach produkcyjnych i kontrolnych	Brak kontroli parametrów po przeniesieniu procesu; Błędne metody pomiarowe; Brak weryfikacji stabilności procesu

Analiza skuteczności procesu Technical Review wykazała, że narzędzie to stanowi istotne wsparcie w identyfikacji i klasyfikacji niezgodności w procesie planowania jakości. w fazie walidacji produktu i rozwoju procesu zidentyfikowano średnio 3,2 niezgodności na projekt, a dominującymi poziomami znaczenia niezgodności były 0 i 4, co potwierdziło zdolność opracowanego i wdrożonego Technical Review do ujawniania niezgodności krytycznych i poważnych w zakresie prowadzonych badań i analiz.

W etapie pełnego wdrożenia TR średnia liczba niezgodności wyniosła 5,0 na projekt, przy czym najwyższe wartości odnotowano w fazie rozwoju produktu – średnio 6 niezgodności na projekt. Dominowały tam przede wszystkim niezgodności na poziomie znaczenia 4 (poważne) oraz 6 (średnie), co wskazuje, że Technical Review w tej fazie planowania jakości pozwalał przede wszystkim na wykrywanie odchyleń o istotnym znaczeniu technicznym, mogących wpływać na wykonalność konstrukcji i zgodność z wymaganiami.

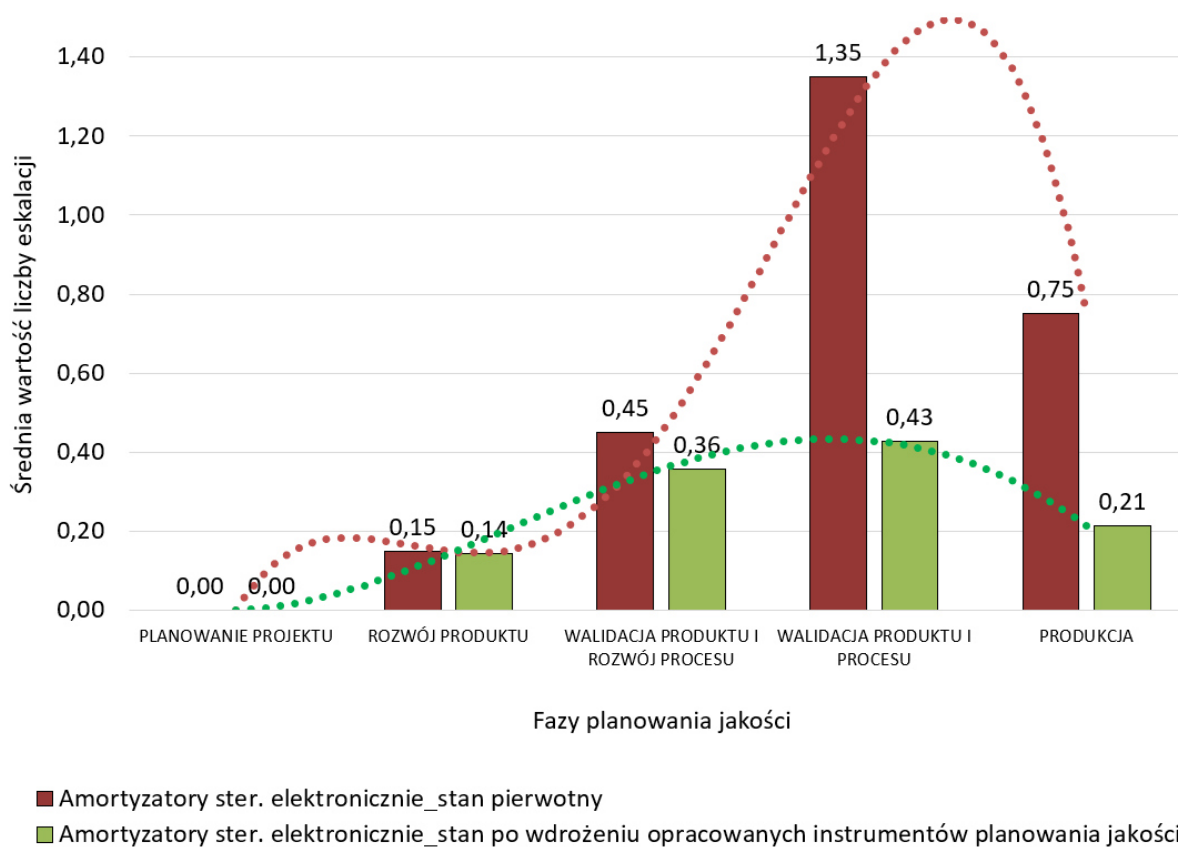
Porównanie obu etapów (walidacja i pełne wdrożenia TR) wskazuje, że średnia wartość liczby niezgodności wzrosła z 3,2 w fazie walidacji do 5,0 w pełnym wdrożeniu. Różnica ta świadczy o skuteczności zastosowania TR po jego pełnej implementacji, a także o rozszerzeniu obszaru analizy, co pozwoliło na wcześniejsze identyfikowanie niezgodności.

W obu etapach wdrożenia TR dominowały niezgodności 1_TR – w realizacji testów i walidacji oraz 2_TR – w dokumentacji projektowej i jakościowej. w pełnym wdrożeniu istotną rolę uzyskały także niezgodności 7_TR – w procesach produkcyjnych i kontrolnych, a dodatkowo ujawniła się kategoria 6_TR – niezgodność z wymaganiami klienta, co świadczy o rozszerzeniu zakresu oceny.

4.4. Ocena wpływu wdrożonych instrumentów na proces planowania jakości

Skuteczność narzędzia Technical Review i Design Review została zweryfikowana poprzez analizę liczby eskalacji w procesie RYG, przed i po ich wdrożeniu. Zestawienie uzyskanych podczas badań wyników pozwoliło ocenić, w jakim stopniu zastosowanie Technical Review oraz Design Review przyczyniły się do ograniczenia liczby niezgodności w procesie planowania jakości w późnych fazach.

Wartość średniej liczby eskalacji w procesie planowania jakości, przed rozpoczęciem badań wynosiła 0,54 na projekt, podczas gdy po wdrożeniu opracowanych instrumentów obniżyła się do wartości 0,23 na projekt. Oznacza to, iż uzyskano w wyniku wdrożenia Technical Review oraz Design Review w procesie planowania jakości redukcję o 57% średniej wartości liczby eskalacji, co stanowi dowód na poprawę skuteczności procesu wczesnego identyfikowania niezgodności w procesie planowania jakości. Uzyskany wynik wskazuje, że zmiany wprowadzone do narzędzia Technical Review dla procesu rozwoju i industrializacji amortyzatorów sterowanych elektronicznie pozwoliły znacząco ograniczyć skalę niezgodności powodujących eskalacje w ramach procesu RYG.

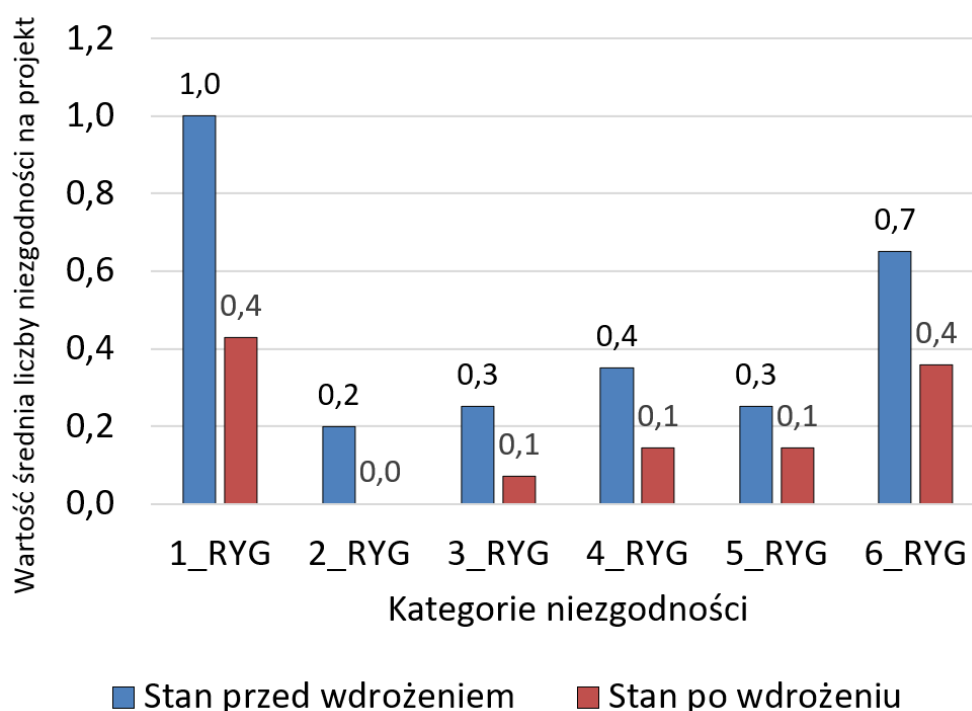


Rysunku 4.4.1. Średnia wartość liczby eskalacji na projekt dla poszczególnych faz planowania jakości (opracowanie własne)

Wykres (rys. 4.4.1) przedstawia średnią wartość liczby eskalacji na projekt wraz z linią trendu dla poszczególnych faz planowania jakości. w fazie planowania projektu nie odnotowano eskalacji ani przed, ani po wdrożeniu zaproponowanych narzędzi. w fazie rozwoju produktu średnia wartość liczby eskalacji spadła z 0,15 do 0,14 na projekt, co oznacza redukcję o około 7%. w przypadku walidacji produktu i rozwoju procesu poprawa wynosiła – z 0,45 do 0,36 wartości średniej liczby eskalacji, czyli o około 20% co stanowi znaczącą poprawę.

Największe zmiany wystąpiły w końcowych fazach planowania jakości. w fazie walidacji produktu i procesu średnia wartość liczby eskalacji zmniejszyła się z 1,35 do 0,43, co stanowi redukcję o 68%. Z kolei w fazie produkcji redukcja uzyskano redukcje średniej wartości liczby eskalacji z 0,75 do 0,21, czyli o 72%. Uzyskane dane stanowią potwierdzenie, że wdrożone instrumenty skutecznie ograniczyły ryzyko eskalacji w końcowych krytycznych fazach planowania jakości, gdzie pierwotnie odnotowywano najwyższe wartości średniej liczby eskalacji

Wykres (rys. 4.4.2) przedstawia porównanie średniej liczby niezgodności w poszczególnych kategoriach RYG, przed i po wdrożeniu opracowanych instrumentów planowania jakości. Dane wskazują, że we wszystkich kategoriach niezgodności odnotowano obniżenie średniej wartości liczby niezgodności, z zróżnicowaną skalą poprawy dla poszczególnych kategorii niezgodności.



Rysunek 4.4.2. Średnia liczba niezgodności w poszczególnych kategoriach RYG, przed i po wdrożeniu opracowanych instrumentów planowania jakości (opracowanie własne)

Najwyższe wartości średniej liczby eskalacji w stanie przed wdrożeniem TR i DR występowały dla kategorii 1_RYG – niespełnienie wymagań dotyczących walidacji produktu (1,0) oraz 6_RYG – niespełnienie wymagań funkcjonalnych i eksploatacyjnych produktu (0,7). Po wdrożeniu

instrumentów średnie wartości liczby zmniejszyły się odpowiednio do 0,4, co odpowiada redukcji średniej wartości liczby eskalacji o 60% oraz 43%. w przypadku kategorii niezgodności 2_RYG – niezgodności w dokumentacji projektowej, została ona całkowicie wyeliminowana (spadek z 0,2 do 0,0). Dla kategorii niezgodności 3_RYG – niespełnienie wymagań materiałowych lub komponentowych oraz 4_RYG – niedotrzymanie terminów projektowania i wdrażania średnia wartości liczby niezgodności zmniejszyły się odpowiednio z 0,3 do 0,1 (redukcja o 67%) i z 0,4 do 0,1 (spadek o 75%). w kategorii 5_RYG – niezgodności w realizacji procesu produkcyjnego, średnia wartość liczby niezgodności obniżyła się z 0,3 do 0,1, co daje poprawę na poziomie 67%.

Podsumowując, największą redukcję niezgodności uzyskano dla kategorii niezgodności: terminowości projektowania i wdrażania (4_RYG – 75%), natomiast najniższą dla kategorii niezgodności: niespełnienie wymagań funkcjonalnych i eksploatacyjnych (6_RYG – 43%). Wyniki te potwierdzają, że wdrożone rozwiązania w ramach niniejszego doktoratu przyniosły znaczący efekt w redukcji liczby niezgodności dla wybranych kategorii niezgodności, szczególnie w zakresie niezgodności dotyczących dokumentacji technicznej oraz harmonogramu realizacji projektów. Po wdrożeniu narzędzia Design Review w procesie planowania jakości nie pojawiają się eskalacje spowodowane niezgodnościami związanymi z dokumentacją techniczną, co stanowi jednoznaczny dowód na skuteczność wdrożenia Design Review w eliminacji niezgodności na wczesnym etapie rozwoju projektu.

W celu oceny skuteczności wdrożonych instrumentów planowania jakości przygotowano tabelaryczne zestawienie (Tabela 4.4.1), prezentujące ich podstawowe cele zastosowania, sposób weryfikacji skuteczności oraz uzyskane wyniki w badanym okresie czasu, ze szczególnym uwzględnieniem redukcji niezgodności w procesie planowania i ograniczenia eskalacji w procesie RYG.

Tabela 4.4.1. Cele zastosowania, weryfikacja skuteczności oraz wyniki oceny wdrożonych instrumentów planowania jakości (opracowanie własne)

INSTRUMENT PLANOWANIA JAKOŚCI	CEL ZASTOSOWANIA	Odwołanie do treści w doktoracie
Design Review	zapewnienie spójności, kompletności i zgodności dokumentacji technicznej produktu oraz eliminacja niezgodności mogących eskalować w dalszych fazach rozwoju projektu	Rozdział 3.7.2
Problem Definition Tool	ujednolicenie sposobu opisu i prezentacji niezgodności w celu usprawnienia komunikacji, podejmowania decyzji oraz zapewnienia odpowiednich i kompletnych danych	Rozdział 3.7.6
Technical Review	uporządkowana ocena danych technicznych i zgodności projektu z wymaganiami oraz możliwościami procesu produkcyjnego (wykonalnością) w celu wczesnej identyfikacji ryzyk	Rozdział 3.7.9

INSTRUMENT PLANOWANIA JAKOŚCI	SPOSÓB WERYFIKACJA SKUTECZNOŚCI	Odwołanie do treści w doktoracie
Design Review	analiza liczby i struktury niezgodności w dokumentacji technicznej oraz ich wpływu na eskalację ryzyka w procesie RYG	Rozdział 3.7.4
Problem Definition Tool	ocena kompletności formularza i liczby iteracji w odniesieniu do trwałego usuwania niezgodności	Rozdział 3.7.7
Technical Review	porównanie średniej wartości liczby i struktury dla kategorii niezgodności identyfikowanych podczas wykorzystania TR, liczba eskalacji ryzyka w procesie RYG przed i po pełnym wdrożeniu TR	Rozdział 3.7.10

INSTRUMENT PLANOWANIA JAKOŚCI	WYNIK WERYFIKACJI SKUTECZNOŚCI	Odwołanie do treści w doktoracie
Design Review	w badanym okresie czasu uzyskano redukcję liczby niezgodności krytycznych i poważnych oraz całkowite wyeliminowanie eskalacji ryzyka związanego z dokumentacją techniczną w procesie RYG (100% redukcji w tym obszarze).	Rozdział 4.1
Problem Definition Tool	przy kompletności formularzy PDT wynoszącej 92,9% uzyskano trwałe usunięcie niezgodności	Rozdział 4.2
Technical Review	w badanym okresie średnia wartość liczby eskalacji w procesie RYG zredukowała się z 0,54 do 0,23 na projekt (redukcja o 57%), największy efekt osiągnięto dla fazy walidacji produktu i procesu – redukcja o 68% oraz w fazie produkcji – redukcja o 72%. Najsilniej zredukowano niezgodności w kategoriach 1_RYG (walidacja produktu, –60%), 4_RYG (terminowość projektowania, –75%), 5_RYG (proces produkcyjny, –67%) oraz 6_RYG (wymagania funkcjonalne i eksploatacyjne, –43%), a niezgodności z kategorii 2_RYG (dokumentacja projektowa) zostały całkowicie wyeliminowane.	Rozdział 4.3

W ramach badań prowadzonych w niniejszej rozprawie zrealizowano cele szczegółowe oraz udzielono odpowiedzi na powiązane z nimi pytania badawcze:

Cel szczegółowy C1: Identyfikacja i analiza niezgodności w procesach rozwoju i industrializacji oraz określenie kategorii niezgodności dostosowanych do specyfiki badanych produktów, w ramach tego celu dokonano:

- **Identyfikacji kluczowych kategorii niezgodności** w procesie planowania jakości, na podstawie danych z procesu eskalacji RYG. Wyodrębniono sześć głównych kategorii niezgodności (Tabela 3.3.1).
- **Porównania rozkładu kategorii niezgodności w procesie planowania jakości** – wykazano, że dla amortyzatorów sterowanych elektronicznie dominują niezgodności w fazie walidacji produktu i procesu oraz w produkcji (Rysunek 3.3.1), podczas gdy w produktach konwencjonalnych maksimum występuje wcześniej – w fazie walidacji produktu i rozwoju procesu (Rysunek 3.3.3).
- **Analizy Pareto** niezgodności według kategorii dla obu typów produktów – w amortyzatorach sterowanych elektronicznie dominują kategorie 1_RYG i 6_RYG (łącznie 60% wszystkich niezgodności – Rysunek 3.3.2), natomiast dla amortyzatorów konwencjonalnych największy udział mają kategorie 4_RYG i 1_RYG (ponad 60% wszystkich niezgodności – Rysunek 3.3.4).
- **Porównania średniej wartości liczby niezgodności na projekt** – analiza (Rysunek 3.3.5) wykazała, że dla amortyzatorów konwencjonalnych maksimum eskalacji występuje w fazie walidacji produktu i rozwoju procesu, natomiast w produktach sterowanych elektronicznie przesunięte jest na późniejsze etapy – walidację końcową i produkcję.
- **Porównania struktury udziału procentowego kategorii niezgodności** – zestawienie (Rysunek 3.3.6) ujawniło, że w produktach sterowanych elektronicznie największy udział mają kategorie 1_RYG– 37% i 6_RYG– 24%, podczas gdy w konwencjonalnych dominują 4_RYG– 39,6% oraz 1_RYG– 29,2%.

Odpowiedź na pytanie badawcze P1 (Czy istnieje różnica w rozkładzie kategorii niezgodności dla produktów konwencjonalnych i mechatronicznych dla poszczególnych faz planowania jakości?):

Przeprowadzone badania i analizy wykazały, że istnieje wyraźna różnica w rozkładzie kategorii niezgodności pomiędzy danymi uzyskanymi dla procesu planowania jakości amortyzatorów konwencjonalnych a sterowanych elektronicznie dla poszczególnych faz.

- Dla amortyzatorów konwencjonalnych największa liczba niezgodności ujawnia się w fazie walidacji produktu i rozwoju procesu (ponad 40% niezgodności – Rysunek 3.3.3, Rysunek 3.3.5), a drugorzędne znaczenie mają faza rozwoju produktu i walidacji końcowej. Dominującą kategorią jest 4_RYG – opóźnienia projektowe i wdrożeniowe (39,6%), a następnie 1_RYG – walidacja produktu (29,2%) (Rysunek 3.3.4, Rysunek 3.3.6).

- Dla amortyzatorów sterowanych elektronicznie maksymalna liczba niezgodności ujawniła się na późniejszej fazie planowania jakości – walidacji produktu i procesu końcowego oraz produkcji (Rysunek 3.3.1, Rysunek 3.3.5). Największy udział mają 1_RYG – niespełnienie wymagań walidacyjnych (37%) oraz 6_RYG – problemy funkcjonalne i eksploatacyjne (24%) (Rysunek 3.3.3, Rysunek 3.3.6).

Powyższe pozwala uznać, że:

- w przypadku produktów konwencjonalnych niezgodności koncentrują się we wcześniejszych fazach planowania jakości i wynikają głównie z terminowości działań projektowych,
- natomiast dla amortyzatorów sterowanych elektronicznie dominują niezgodności techniczne i funkcjonalne, które ujawniają się w końcowych fazach planowania jakości, co generuje wyższe koszty ich eliminacji i większe ryzyko dla jakości wyrobu finalnego.

Cel szczegółowy C2: Implementacja i walidacja autorskich instrumentów planowania jakości, zaprojektowanych w odpowiedzi na zidentyfikowane problemy związane z kompletnością dokumentacji projektowej, oceną spełnienia wymagań oraz systematyzacją procesu identyfikacji i definiowania niezgodności.

Realizacja tego celu została przedstawiona w rozdziale 3.7 i obejmowała opracowanie oraz praktyczne wdrożenie trzech autorskich instrumentów planowania jakości:

- **Design Review** – wdrożone i zwalidowane (Rysunek 3.7.1.1, 3.7.1.2).
- **Technical Review** – rozszerzone o pytania dedykowane dla amortyzatorów mechatronicznych, wdrożone jako bramka jakościowa w procesie APQP. Wdrożone i zwalidowane (Rysunek 3.7.8.1, Tabela 3.7.9.1).
- **Problem Definition Tool (PDT)** – wdrożone i zwalidowany jako formularz standaryzujący opis i prezentację niezgodności (Rysunek 3.7.5.1, Rysunek 3.7.6.1).

Walidacja instrumentów została przeprowadzona w warunkach rzeczywistych projektów rozwojowych amortyzatorów konwencjonalnych i sterowanych elektronicznie.

Odpowiedź na pytanie badawcze P2 (Jak implementacja autorskich instrumentów planowania jakości przyczynia się do poprawy kompletności dokumentacji projektowej, oceną spełnienia wymagań oraz systematyzacją procesu identyfikacji i definiowania niezgodności?):

Wyniki uzyskanych badań pozwalają uznać, iż implementacja autorskich instrumentów planowania jakości przyczyniła się w sposób mierzalny do poprawy kompletności dokumentacji technicznej, oceny spełnienia wymagań oraz systematyzacji identyfikacji niezgodności, szczegółły przedstawiono tabeli 4.4.1.

Cel szczegółowy C3: Analiza rozkładu poszczególnych kategorii niezgodności i średniej wartości liczby eskalacji dla poszczególnych faz procesu rozwoju i industrializacji, w celu wskazania dominujących kategorii oraz oceny skuteczności zastosowanych instrumentów planowania jakości.

Wyniki badań po implementacji opracowanych rozwiązań przedstawiono w zakresie ich analizy w rozdziale 4:

- Rysunek 4.4.1 – średnia wartość liczby eskalacji została wyraźnie obniżona, a jednocześnie widoczne było nieznaczne przesunięcie maksimum linii trendu eskalacji w kierunku wcześniejszej fazy procesu planowania jakości (z fazy walidacji produktu i procesu w stronę fazy rozwoju produktu). Potwierdza to skuteczność wdrożonych instrumentów w identyfikowaniu niezgodności na wcześniejszym etapie cyklu APQP.
- Rysunek 4.4.2 – dominujące kategorie niezgodności różniły się w zależności od rodzaju produktu: dla amortyzatorów konwencjonalnych największy udział miały problemy z terminowością projektowania (4_RYG) i procesem produkcyjnym (8_RYG), dla amortyzatorów mechatronicznych dominowały niezgodności związane z walidacją produktu (1_RYG) i wymaganiami funkcjonalnymi/eksploatacyjnymi (6_RYG).

Przeprowadzona ocena skuteczności wskazuje, że wdrożone instrumenty (Design Review, Technical Review, PDT) pozwoliły uzyskać redukcję średniej wartości liczby eskalacji i ograniczyć dominujące kategorie niezgodności, a także przesunęły wykrywanie niezgodności na wcześniejsze fazy procesu planowania jakości, co obniżyło ryzyko kosztownych korekt w fazie końcowej planowania jakości.

Odpowiedź na pytanie badawcze P3 (Czy istnieje różnica w rozkładzie liczby niezgodności dla produktów mechatronicznych dla poszczególnych faz planowania jakości po wdrożeniu opracowanych rozwiązań?):

W wyniku przeprowadzonych badań i analizy uzyskanych danych po wdrożeniu autorskich instrumentów planowania jakości średnia wartość liczby eskalacji dla produktów mechatronicznych uległa redukcji, a maksimum linii trendu ich występowania przesunęło w kierunku wcześniejszej fazy rozwoju produktu (Rysunek 4.4.1).

Odpowiedź na pytanie badawcze P4 (Czy wdrożenie opracowanych instrumentów planowania jakości wpłynęło na zmianę rozkładu kategorii niezgodności?):

W wyniku przeprowadzonych badań i analizy uzyskanych danych po wdrożeniu autorskich instrumentów planowania jakości zmienił się rozkład kategorii niezgodności – zredukował się udział dominujących kategorii niezgodności, a część kategorii, jak niezgodności dokumentacyjne (2_RYG), została całkowicie wyeliminowana (Rysunek 4.4.2).

4.5. Możliwości rozwoju i doskonalenia opracowanych instrumentów planowania jakości

Dalsze doskonalenie opracowanych instrumentów planowania jakości stanowi naturalny etap ich cyklu życia, zgodny z logiką ciągłego doskonalenia. Walidacja przeprowadzona w rozdziale 4 potwierdziła skuteczność Design Review, Technical Review oraz Problem Definition Tool w ograniczaniu liczby niezgodności i poprawie jakości procesów rozwojowych. Jednocześnie analiza wyników ujawniła obszary, w których możliwe jest dalsze zwiększanie skuteczności zaproponowanych instrumentów, pełniejsze dopasowanie do specyfiki produktów mechatronicznych oraz większa integracja z innymi instrumentami systemu planowania jakości. Na podstawie przeprowadzonych badań oraz doświadczeń praktycznych wskazano możliwe kierunki dalszego doskonalenia poszczególnych instrumentów, których celem jest zwiększenie ich skuteczności i lepsze dopasowanie do specyfiki badanych procesów.

W przypadku narzędzia Design Review kierunkiem dalszego doskonalenia powinno być opracowanie spójnej kodyfikacji oraz standardowych opisów dla najczęściej występujących niezgodności. Takie rozwiązanie zapewniłoby jednolitą klasyfikację niezależnie od tego, który zespół przeprowadza ocenę, eliminując rozbieżności w interpretacji wyników. Potrzeba standaryzacji uwidoczniła się podczas próby zastosowania Design Review w projektach amortyzatorów konwencjonalnych, gdzie różne zespoły sprawdzające klasyfikowały podobne niezgodności w odmienny sposób. Równocześnie dalszy rozwój instrumentu mógłby obejmować jego cyfryzację i integrację z Technical Review, którego stanowi jedno z kluczowych wejść w procesie planowania jakości. Cyfrowe powiązanie obu instrumentów pozwoliłoby na automatyczne przenoszenie danych i ocen z Design Review do kolejnych etapów Technical Review, zwiększając spójność dokumentacji i ograniczając konieczność powielania zapisów.

W przypadku instrumentu Problem Definition Tool kierunkiem dalszego doskonalenia powinna być jego dalsza cyfryzacja i stopniowa migracja do środowiska umożliwiającego szerszą integrację z innymi instrumentami jakościowymi. Obecne funkcjonowanie w środowisku OneNote daje podstawowe możliwości, takie jak łatwe udostępnianie formularzy czy dołączanie linków do dokumentów, jednak ogranicza pełną automatyzację przepływu informacji. Rozwój instrumentu powinien zmierzać w stronę systemu pozwalającego na automatyczne wypełnianie wybranych sekcji formularza danymi pochodzącymi bezpośrednio z ich źródeł – np. procesu problem solving, analiz FMEA czy rejestrów działań korygujących. Zmiana środowiska na bardziej zintegrowane pozwoliłaby nie tylko przyspieszyć pracę zespołów projektowych, ale także zwiększyć spójność i wiarygodność danych w całym procesie planowania jakości.

Dalszy rozwój Technical Review powinien koncentrować się na ciągłym doskonaleniu zawartości merytorycznej instrumentu – przede wszystkim poprzez systematyczne aktualizowanie pytań pomocniczych w poszczególnych sekcjach zgodnie z nowo ujawnionymi ryzykami oraz eliminację tych, które okazały się nieadekwatne. Obecna forma arkusza w Excelu

zapewnia przejrzystość i elastyczność, jednak ogranicza możliwości integracji z innymi instrumentami jakości. Kierunkiem dalszej cyfryzacji mogłoby być przeniesienie Technical Review do dedykowanego środowiska (np. platformy QMS lub systemu zarządzania projektami), co umożliwiłoby automatyczną identyfikację statusów, łatwiejsze raportowanie oraz powiązanie z dokumentacją projektową i wynikami testów. Takie rozwiązanie zwiększyłoby transparentność procesu, usprawniło analizę trendów i pozwoliło lepiej wykorzystywać wiedzę zdobytą w ramach Lessons Learned.

5. Wnioski

Na podstawie przeprowadzonych badań i analiz sformułowano następujące wnioski:

1. Przeprowadzone badania oraz analiza uzyskanych wyników pozwoliły udowodnić postawioną hipotezę, iż dopasowanie i wdrożenie wybranych instrumentów planowania jakości ma istotny wpływ na poprawę skuteczności i efektywności procesu rozwoju oraz industrializacji nowoczesnych systemów mechatronicznych. Czego potwierdzeniem jest uzyskanie zredukowania średniej wartości liczby eskalacji ryzyka związanego z wystąpieniem niezgodności w późnych fazach planowania jakości, co przedstawiają dane przedstawione na rysunku 4.4.1.
2. Analiza skuteczności opracowanych instrumentów planowania jakości wskazuje na zróżnicowany stopień ich uniwersalności i kontekstowości. Design Review ma charakter uniwersalny i może być stosowane do oceny dokumentacji technicznej również w przypadku innych produktów oraz przez różne zespoły sprawdzające. Kierunkiem dalszego doskonalenia pozostaje kodyfikacja występujących niezgodności, tak aby były one interpretowane w sposób jednolity i konsekwentnie powiązane z wpływem na funkcję końcowego produktu. Technical Review stanowi przykład narzędzia o silnie kontekstowym charakterze – jego skuteczność w dużej mierze zależy od dopasowania pytań pomocniczych do specyfiki analizowanego produktu, zwłaszcza w przypadku złożonych produktów. Z kolei Problem Definition Tool wykazał się uniwersalnością, ponieważ jako narzędzie porządkujące i standaryzujące sposób prezentacji niezgodności może być stosowane niezależnie od rodzaju produktu i struktury zespołu projektowego.
3. Opracowane nowe lub zmodyfikowane instrumenty zostały zaimplementowane w istniejącym procesie planowania jakości funkcjonującym w organizacji w ramach systemu Ten PLUS (Rysunek 3.7.1.1 oraz 3.7.8.1). Doświadczenia z ich stosowania wskazują, że nawet instrumenty, które nie należą do głównych instrumentów planowania jakości, mogą istotnie zwiększać skuteczność procesu planowania jakości, pod warunkiem że są konsekwentnie i systematycznie wykorzystywane. Oznacza to, że wartość instrumentu planowania jakości nie wynika jedynie z jego miejsca w strukturze APQP, lecz przede wszystkim z praktycznej roli, jaką odgrywa w zapewnianiu kompletności danych, wczesnej identyfikacji ryzyk oraz wspieraniu komunikacji w zespołach projektowych
4. Analiza zależności pomiędzy wartością liczby kryterialnej Severity a liczbą iteracji potrzebnych do rozwiązania niezgodności (Rysunek 4.2.2) wskazuje na istnienie słabej, lecz zauważalnej korelacji. Większa liczba iteracji częściowo wiąże się z wyższym poziomem istotności analizowanych niezgodności, które wymagają bardziej szczegółowych danych i wielokrotnej weryfikacji. Niska wartość współczynnika determinacji ($R^2 = 0,1717$) potwierdza jednak, że wpływ liczby kryterialnej Severity na liczbę iteracji jest ograniczony, a kluczowe znaczenie mają także inne czynniki – m.in.

kompletność zgromadzonych danych, doświadczenie zespołu czy charakter analizowanej kategorii niezgodności.

Wnioski dotyczące wdrożenia

1. Wdrożenie opracowanych instrumentów (Design Review, Technical Review, Problem Definition Tool) pozwoliło na wcześniejsze wykrywanie i skuteczniejsze eliminowanie niezgodności, co przełożyło się na zmniejszenie liczby eskalacji w procesie RYG oraz całkowite wyeliminowanie eskalacji spowodowanych niezgodnościami w dokumentacji technicznej produktu. W praktyce oznacza to ograniczenie ryzyka kosztownych korekt w końcowych fazach projektu oraz zwiększa przewidywalność realizacji harmonogramów projektów.
2. Standaryzacja opisu niezgodności (PDT) usprawniła komunikację w zespołach projektowych, ograniczając liczbę niepotrzebnych eskalacji wynikających z niespójnych opisów. W wyniku tego spotkania projektowe stały się bardziej efektywne, a czas analizy i podejmowania decyzji uległ skróceniu. Jednocześnie organizacja zyskała możliwość porównywania projektów w oparciu o jednolite dane, co ułatwiło identyfikację powtarzalnych problemów oraz wdrażanie działań prewencyjnych, wzmacniając proces uczenia się organizacji (Lessons Learned).

Spis Literatury

- [1] Lingitz, L., Gallina, V., Breitschopf, J., Finamore, L., Sihn, W. (2023). Quality in production planning: Definition, quantification and a machine learning based improvement method. *Procedia Computer Science*, 217, 358-365.
- [2] Juran, J. M., Defeo, J. A. (2017). Quality improvement and breakthrough performance. *Juran's quality handbook*. 7th ed. New York: McGraw-Hill Education, 155-212.
- [3] Kerr, C. I. V., Roy, R., Sackett, P. J. (2006). Requirements management: an enabler for concurrent engineering in the automotive industry. *International Journal of Production Research*, 44(09), 1703-1717.
- [4] Ryalat, M., Franco, E., Elmoaqet, H., Almtireen, N., Al-Refai, G. (2024). The integration of advanced mechatronic systems into industry 4.0 for smart manufacturing. *Sustainability*, 16(19), 8504.
- [5] O'connor, P. D., Kleyner, A. V. (2025). *Practical reliability engineering*. John Wiley and sons.
- [6] Rudolf, Ł., Roszak, M., Kuchariková, L. (2024). Evolution of the Product and Process Requirements during the Project Lifetime. *COMMUNICATIONS*, 26(4), B252-B259.
- [7] Habchi, G., Barthod, C. (2016). An overall methodology for reliability prediction of mechatronic systems design with industrial application. *Reliability Engineering and System Safety*, 155, 236-254.
- [8] Li, Y., Liu, W., Liu, Q., Zheng, X., Sun, K., Huang, C. (2024). Complying with iso 26262 and iso/sae 21434: A safety and security co-analysis method for intelligent connected vehicle. *Sensors*, 24(6), 1848.
- [9] Cash, P., Daalhuizen, J., Hekkert, P. (2023). Evaluating the efficacy and effectiveness of design methods: A systematic review and assessment framework. *Design Studies*, 88, 101204.
- [10] Cirtina, L. M., Dumitrascu, A. E., Cazacu, D. V., Ianasi, C. A., Rădulescu, C., Tătar, A. M., ... and Cirtina, D. (2025). Eight-Disciplines Analysis Method and Quality Planning for Optimizing Problem-Solving in the Automotive Sector: A Case Study. *Processes*, 13(10), 3121.
- [11] Chen, L., Jiao, J., Zhao, T. (2020). A novel hazard analysis and risk assessment approach for road vehicle functional safety through integrating STPA with FMEA. *Applied Sciences*, 10(21), 7400.
- [12] Roszak, M., Spilka, M., Kania, A. (2015). Environmental failure mode and effects analysis (FMEA)—a new approach to methodology. *Metallurgija*, 54(2), 449-451.
- [13] Kania, A., Roszak, M., Spilka, M. (2014). Evaluation of FMEA methods used in the environmental management. *Archives of Materials Science and Engineering*, 65(1), 37-44.
- [14] Dixon, J. C. (2007). *The shock absorber handbook*. John Wiley and Sons.
- [15] Jazar, R. N. (2025). *Vehicle dynamics: theory and application*. Springer Nature.
- [16] Bolton, W. (2003). *Mechatronics: electronic control systems in mechanical and electrical engineering*. Pearson Education.
- [17] Palhau, M., Sá, J. C., Ávila, P., Dinis-Carvalho, J., Rodrigues, C., Santos, G. (2024). Toyota Way—the Heart of Toyota Production System and Its Impact on Sustainable Company Growth. *Quality Innovation Prosperity*, 28(3), 23-45.
- [18] Sokovic, M., Pavletic, D., Pipan, K. K. (2010). Quality improvement methodologies—PDCA cycle, RADAR matrix, DMAIC and DFSS. *Journal of achievements in materials and manufacturing engineering*, 43(1), 476-483.
- [19] De Mast, J., Lokkerbol, J. (2012). An analysis of the Six Sigma DMAIC method from the perspective of problem solving. *International Journal of Production Economics*, 139(2), 604-614.
- [20] Womak, J., Jones, D. T., Roos, D. (1990). *The machine that changed the world*. New York: Rawson Associates.

- [21] Seider, W. D., Lewin, D. R., Seader, J. D., Widagdo, S., Gani, R., Ng, K. M. (2016). Product and process design principles: synthesis, analysis and evaluation. John Wiley and Sons.
- [22] Zu, X., Fredendall, L. D., Douglas, T. J. (2008). The evolving theory of quality management: the role of Six Sigma. *Journal of operations Management*, 26(5), 630-650.
- [23] Ward, A. C., Sobek II, D. K. (2014). Lean product and process development. Lean Enterprise Institute.
- [24] Pahl, G., Beitz, W. (2013). Engineering design: a systematic approach. Springer Science and Business Media.
- [25] Holweg, M. (2007). The genealogy of lean production. *Journal of operations management*, 25(2), 420-437.
- [26] Giannantonio, C. M., Hurley-Hanson, A. E. (2011). Frederick Winslow Taylor: Reflections on the relevance of The Principles of Scientific Management 100 years later. *Journal of Business and Management*, 17(1), 7–10.
- [27] Cabanillas, C., Resinas, M., Ruiz-Cortés, A. (2018). A template-based approach for responsibility management in executable business processes. *Enterprise information systems*, 12(5), 550-586.
- [28] Lee, W. Y., Lee, S. H., Jin, C., Hyun, C. T. (2021). Development of the RACI model for processes of the closure phase in construction programs. *Sustainability*, 13(4), 1806.
- [29] Beckford, J. (2016). Quality: A critical introduction. Routledge.
- [30] Boothroyd, G., Dewhurst, P., Knight, W. A. (2010). Product design for manufacture and assembly. CRC press.
- [31] Carnevali, J. A., Miguel, P. C. (2008). Review, analysis and classification of the literature on QFD—Types of research, difficulties and benefits. *International Journal of Production Economics*, 114(2), 737-754.
- [32] Montgomery, D. C. (2020). Introduction to statistical quality control. John Wiley and sons.
- [33] Ryan, T. P. (2011). Statistical methods for quality improvement. John Wiley and Sons.
- [34] Schiffauerova, A., Thomson, V. (2006). A review of research on cost of quality models and best practices. *International Journal of Quality and Reliability Management*, 23(6), 647-669.
- [35] Saier, M. C. (2017). Going back to the roots of WA Shewhart (and further) and introduction of a new CPD cycle. *International Journal of Managing Projects in Business*, 10(1), 143-166.
- [36] Schilling, E. G., Neubauer, D. V. (2009). Acceptance sampling in quality control. Chapman and Hall/CRC.
- [37] Bersimis, S., Psarakis, S., Panaretos, J. (2007). Multivariate statistical process control charts: an overview. *Quality and Reliability engineering international*, 23(5), 517-543.
- [38] Goetsch, D. L., Davis, S. B. (2014). Quality management for organizational excellence (Vol. 427). Upper Saddle River, NJ: Pearson.
- [39] Dahlgaard, J. J., Mi Dahlgaard-Park, S. (2006). Lean production, six sigma quality, TQM and company culture. *The TQM magazine*, 18(3), 263-281.
- [40] Moen, R., Norman, C. (2006, May). Evolution of the PDCA cycle.
- [41] Gryna, F. M., Chua, R. C. H., De Feo, J. A., Juran, J. M. (2007). Juran's quality planning and analysis: For enterprise quality.
- [42] Bergman, B., Klefsjö, B. (2010). Quality from customer needs to customer satisfaction. Studentlitteratur AB.
- [43] Omachonu, V. K., Ross, J. E. (2004). Principles of total quality. Crc Press.
- [44] Anderson, D. M. (2004). Design for manufacturability and concurrent engineering: how to design for low cost, design in high quality, design for lean manufacture, design quickly for fast production. CIM press.
- [45] Ishikawa, K. (1985). What is total quality control? The Japanese way. Prentice Hall.

- [46] Liker, J. K., Franz, J. K. (2011). The Toyota way to continuous improvement: Linking strategy and operational excellence to achieve superior performance. (No Title).
- [47] Liker, J. K., Hoseus, M. Culture—The Heart and Soul of the Toyota Way, Tata McGraw-Hill Edition, New Delhi, 2008, xxx+ 562 pp. Rs. 450, Soft.
- [48] Romero, D., Gaiardelli, P., Powell, D., Wuest, T., Thürer, M. (2019). Rethinking jidoka systems under automation and learning perspectives in the digital lean manufacturing world. IFAC-PapersOnLine, 52(13), 899-903.
- [49] Lazarevic, M., Mandic, J., Sremcevic, N., Vukelic, D., Debevec, M. (2019). A systematic literature review of Poka-Yoke and novel approach to theoretical aspects. Strojnicki Vestnik/Journal of Mechanical Engineering, 65(7-8), 454-467.
- [50] Psomas, E., Antony, J. (2017). Total quality management elements and results in higher education institutions: The Greek case. Quality Assurance in Education, 25(2), 206-223.
- [51] Talib, F., Rahman, Z., Qureshi, M. N. (2010). The relationship between total quality management and quality performance in the service industry: a theoretical model. Talib, F., Rahman, Z. and Qureshi, MN (2010), "The relationship between total quality management and quality performance in the service industry: a theoretical model", International Journal of Business, Management and Social Sciences (IJBMSS), MultiCraft, 1(1), 113-128.
- [52] Casadesús, M., Karapetrovic, S. (2005). Has ISO 9000 lost some of its lustre? A longitudinal impact study. International journal of operations and production management, 25(6), 580-596.
- [53] Sharma, J. (2021). Quality function deployment: exploiting interrelationships for progressive prioritization. The TQM Journal, 33(3), 681-705.
- [54] Akao, Y. (1990). Quality function deployment: integrating customer requirements into product design. Productivity press.
- [55] Roy, R. K. (2010). A primer on the Taguchi method. Society of manufacturing engineers.
- [56] Antony, J. (2023). Design of experiments for engineers and scientists. Elsevier.
- [57] Gibbon, P., Henriksen, L. F. (2011). On the Pre-history of ISO 9000: The Making of a Neo-liberal Standard. Governing through standards: Origins, drivers and limitations. Basingstoke: Palgrave Macmillan, 130-58.
- [58] Scott, J. (2005). ISO 9000 in service: the good, the bad and the ugly. Quality progress, 38(9), 42.
- [59] Psarommatis, F., Azamfirei, V. (2024). Zero Defect Manufacturing: A complete guide for advanced and sustainable quality management. Journal of Manufacturing Systems, 77, 764-779.
- [60] Murumkar, A., Teli, S. N., Bhushi, U. M., Deshpande, A. S. (2017). Hidden cost of quality: a review. In 11th ISDSI International Conference, At IIM (pp. 1-20).
- [61] Neves, F. D. O., Salgado, E. G., Beijo, L. A., Lira, J. M. S., Ribeiro, L. H. M. D. S. (2021). Analysis of the quality management system for automotive industry-ISO/TS 16949 in the world. Total Quality Management and Business Excellence, 32(1-2), 153-176.
- [62] Lovitt, M. (1996). Continuous improvement through the QS-9000 road map. Quality Progress, 29(2), 39.
- [63] Hoyle, D. (2000). Automotive quality systems handbook. Elsevier.
- [64] Kluse, C. (2020). A critical analysis of the AIAG-VDA FMEA; Does the newly released AIAG-VDA method offer improvements over the former AIAG method?. Journal of Management and Engineering Integration, 13(1).
- [65] Lupo, M. A. (2018). Application of Project Management tools to the activities of the APQP (Doctoral dissertation, Politecnico di Torino).
- [66] Kuei, C. H., Lu, M. H. (2013). Integrating quality management principles into sustainability management. Total Quality Management and Business Excellence, 24(1-2), 62-78.

- [67] Frazzon, E. M., Rodriguez, C. M. T., Pereira, M. M., Pires, M. C., Uhlmann, I. (2019). Towards supply chain management 4.0. *Brazilian Journal of Operations and Production Management*, 16(2), 180-191.
- [68] Kania, R., Sakiewicz, P., Roszak, M. (2018). Innowacyjność procesowa w strategii zarządzania łańcuchem dostaw. *Marketing i Rynek*, (9 (CD)), 813-822.
- [69] Tkaczyk, S., Roszak, M. Analiza procesu technologicznego w oparciu o kryterium wartości dodanej.
- [70] Hoyle, D. (2017). *ISO 9000 Quality Systems Handbook-updated for the ISO 9001: 2015 standard: Increasing the Quality of an Organization's Outputs*. Routledge.
- [71] Fonseca, L. M. (2015). From Quality Gurus and TQM to ISO 9001: 2015: a review of several quality paths. *International journal for quality research*, 9(1).
- [72] Calvo-Mora, A., Pedro, E. D. M., Suárez, E. (2024). Exploring barriers to Quality 4.0 implementation: a multivariate analysis. *The tqm journal*.
- [73] Lee, J., Bagheri, B., Kao, H. A. (2015). A cyber-physical systems architecture for industry 4.0-based manufacturing systems. *Manufacturing letters*, 3, 18-23.
- [74] Sony, M., Naik, S. (2020). Critical factors for the successful implementation of Industry 4.0: a review and future research direction. *Production Planning and Control*, 31(10), 799-815.
- [75] Vinodh, S., Wankhede, V. A. (2021). Application of fuzzy DEMATEL and fuzzy CODAS for analysis of workforce attributes pertaining to Industry 4.0: a case study. *International Journal of Quality and Reliability Management*, 38(8), 1695-1721.
- [76] Qi, Q., Tao, F. (2018). Digital twin and big data towards smart manufacturing and industry 4.0: 360 degree comparison. *Ieee Access*, 6, 3585-3593.
- [77] Burggraef, P., Wagner, J., Heinbach, B., Steinberg, F., Schmallenbach, L., Garcke, J., ... and Wolter, M. (2021). Predictive analytics in quality assurance for assembly processes: lessons learned from a case study at an industry 4.0 demonstration cell. *Procedia CIRP*, 104, 641-646.
- [78] Ben-Daya, M., Hassini, E., Bahroun, Z. (2019). Internet of things and supply chain management: a literature review. *International journal of production research*, 57(15-16), 4719-4742.
- [79] Wheeler, D. J. (1995). *Advanced topics in statistical process control (Vol. 470)*. Knoxville, TN: SPC press.
- [80] Tao, F., Cheng, J., Qi, Q., Zhang, M., Zhang, H., Sui, F. (2018). Digital twin-driven product design, manufacturing and service with big data. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 94(9), 3563-3576.
- [81] Lee, J., Kao, H. A., Yang, S. (2014). Service innovation and smart analytics for industry 4.0 and big data environment. *Procedia cirp*, 16, 3-8.
- [82] Carvalho, T. P., Soares, F. A., Vita, R., Francisco, R. D. P., Basto, J. P., Alcalá, S. G. (2019). A systematic literature review of machine learning methods applied to predictive maintenance. *Computers and Industrial Engineering*, 137, 106024.
- [83] Goodall, P., Sharpe, R., West, A. (2019). A data-driven simulation to support remanufacturing operations. *Computers in Industry*, 105, 48-60.
- [84] Crosby, P. B. (1979). *Quality is free-if you understand it*. Winter Park Public Library History and Archive Collection, 4.
- [85] Hamrol, A. (2013). *Zarządzanie jakością z przykładami*. Wydawnictwo naukowe PWN.
- [86] Hamrol, A., Mantura, W. (2013). *Zarządzanie jakością: teoria i praktyka*. Wydawnictwo Naukowe PWN.
- [87] Borys, T., Rogala, P., Wawak, S. (2024). Zarządzanie jakością-od selektywnej do zrównoważonej jakości. *Problemy Jakości*, (1), 11-18.
- [88] Blikle, A. J. (2009). *Doktryna jakości. Rzecz o Turkusowej Samoorganizacji*.
- [89] Honzíková, J., Tomášková, T. (2025). Creative Thinking and its Role in Industry 5.0 Era. *Acta Paedagogica Vilnensia*, 54, 170-189.

- [90] Baiocchi, R., Lizot, M., Santos, E. A. P. (2025). A Review of Quality Improvement Framework for Industry 4.0. *Procedia CIRP*, 132, 13-18.
- [91] Okano, M. T., Lopes, W. A. C., Ruggero, S. M., Vendrametto, O., Fernandes, J. C. L. (2025). Edge AI for Industrial Visual Inspection: YOLOv8-Based Visual Conformity Detection Using Raspberry Pi. *Algorithms*, 18(8), 510.
- [92] Sundaram, S., Zeid, A. (2023). Artificial intelligence-based smart quality inspection for manufacturing. *Micromachines*, 14(3), 570.
- [93] Rahman, M. A., Shahriar, M. F., Iqbal, K., Abushaiba, A. A. (2025). Enabling Intelligent Industrial Automation: A Review of Machine Learning Applications with Digital Twin and Edge AI Integration. *Automation*, 6(3), 37.
- [94] Hubka, V., Eder, W. E. (2012). *Theory of technical systems: a total concept theory for engineering design*. Springer Science and Business Media.
- [95] Gueorguiev, T. (2024, November). A Critical Review of the New APQP Reference Manual for Automotive Quality Management. In *2024 5th International Conference on Communications, Information, Electronic and Energy Systems (CIEES)* (pp. 1-5). IEEE.
- [96] Țîțu, A. M., Pop, G. I. Advanced Product Quality Planning Management in a Knowledge-Based Organization.
- [97] Oladoyin, A. O. (2016). *Production Planning: Applying Advanced Product Quality Planning (APQP) Metrics for Reduction of Defect in Plastic Injection Molding*.
- [98] Hermans, J., Liu, Y. (2013). Quality management in the new product development: A PPAP approach. *Quality Innovation Prosperity*, 17(2), 37-51.
- [99] Rydström, A., Viström, J. (2019). *Production part approval process evaluation*.
- [100] Plinta, D., Golinska, E., Dulina, L. (2021). PRACTICAL APPLICATION OF THE NEW APPROACH TO FMEA METHOD ACCORDING TO AIAG AND VDA REFERENCE MANUAL. *Komunikácie*, 23(4).
- [101] Ramly, E. F., Atan, H. (2020). FMEA AIAG-VDA-Commentary and Case Study. In *Proceedings of the International Conference on Industrial Engineering and Operations Management* (pp. 1-8).
- [102] Ouyang, L., Che, Y., Yan, L., Park, C. (2022). Multiple perspectives on analyzing risk factors in FMEA. *Computers in Industry*, 141, 103712.
- [103] Harpster, R. A. (2022, January). AIAG VDA and SAE J1739 DFMEA Methods, Similarities, Differences and Impact on the Auto Industry. In *2022 Annual Reliability and Maintainability Symposium (RAMS)* (pp. 1-6). IEEE.
- [104] Stamatis, D. H. (2018). *Advanced product quality planning: the road to success*. CRC Press.
- [105] Carlson, C. S. (2014, January). Understanding and applying the fundamentals of FMEAs. In *Annual Reliability and Maintainability Symposium* (Vol. 10, No. 1, pp. 1-35).
- [106] Varzakas, T. H., Arvanitoyannis, I. S. (2007). Application of Failure Mode and Effect Analysis (FMEA), cause and effect analysis, Pareto diagram in conjunction with HACCP to a corn curl manufacturing plant. *Critical reviews in food science and nutrition*, 47(4), 363-387.
- [107] Subriadi, A. P., Najwa, N. F. (2020). The consistency analysis of failure mode and effect analysis (FMEA) in information technology risk assessment. *Heliyon*, 6(1).
- [108] Rudolf, Ł., Roszak, M. (2022). Tools of product quality planning in the production part approval process. *Archives of Materials Science and Engineering*, 118(2), 67-74.
- [109] Zheng, L. Y., Liu, Q., McMahon, C. A. (2010, December). Integration of process FMEA with product and process design based on key characteristics. In *Proceedings of the 6th CIRP-sponsored international conference on digital enterprise technology* (pp. 1673-1686). Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg.
- [110] Vandenbemden, J. (2024). The AIAG Control Plan Manual. *Quality*, 63(9), 12-12.
- [111] Omisola, J. O., Shiyabola, J. O., Osho, G. O. (2020). A Predictive Quality Assurance Model Using Lean Six Sigma: Integrating FMEA, SPC, Root Cause Analysis for Zero-Defect Production Systems. *Unknown Journal*.

- [112] Rother, M., Shook, J. (2003). Learning to see: value stream mapping to add value and eliminate muda. Lean enterprise institute.
- [113] George, M. L., George, M. (2003). Lean six sigma for service (p. 273). New York, NY: McGraw-Hill.
- [114] George, M. O. (2010). The lean six sigma guide to doing more with less: cut costs, reduce waste, lower your overhead. John Wiley and Sons.
- [115] Pepper, M. P., Spedding, T. A. (2010). The evolution of lean Six Sigma. International journal of quality and reliability management, 27(2), 138-155.
- [116] Krishnan, S., Mathiyazhagan, K., Sreedharan, V. R. (2020). Developing a hybrid approach for lean six sigma project management: A case application in the reamer manufacturing industry. IEEE Transactions on Engineering Management, 69(6), 2897-2914.
- [117] Rudolf, Ł., Roszak, M. (2024). Technological and Managerial Aspects in the Context of Business Process Management and Optimization. Decision Making in Manufacturing and Services, 27-38.
- [118] Saihi, A., Awad, M., Ben-Daya, M. (2023). Quality 4.0: leveraging Industry 4.0 technologies to improve quality management practices—a systematic review. International Journal of Quality and Reliability Management, 40(2), 628-650.
- [119] Filz, M. A., Bosse, J. P., Herrmann, C. (2024). Digitalization platform for data-driven quality management in multi-stage manufacturing systems. Journal of Intelligent Manufacturing, 35(6), 2699-2718.
- [120] Wang, S., Yang, J., Yang, B., Li, D., Kang, L. (2024). An intelligent quality control method for manufacturing processes based on a Human–Cyber–Physical knowledge graph. Engineering, 41, 242-260.
- [121] Hecht, M., Dimpfl, E., Pinchak, J. (2015, October). Using SysML to automatically generate of failure modes and effects analyses. In INCOSE International Symposium (Vol. 25, No. 1, pp. 1357-1372).
- [122] Filz, M. A., Langner, J. E. B., Herrmann, C., Thiede, S. (2021). Data-driven failure mode and effect analysis (FMEA) to enhance maintenance planning. Computers in Industry, 129, 103451.
- [123] Xia, Y., Jazdi, N., Weyrich, M. (2024, September). Enhance FMEA with Large Language Models for Assisted Risk Management in Technical Processes and Products. In 2024 IEEE 29th International Conference on Emerging Technologies and Factory Automation (ETFA) (pp. 1-4). IEEE.
- [124] Younus, H., Doikin, A., Campean, F., Kabir, S., Abdullatif, A., Delaux, D., Bonnaud, P. (2024). An Extended Function-Behaviour-Structure Ontology to support FMEA within a System Engineering Context. Procedia CIRP, 128, 644-649.
- [125] Yu, J., Zeng, Q., Yu, Y., Wu, S., Ding, H., Ma, W., ... and Yang, J. (2023). Failure mode and effects analysis based on rough cloud model and MULTIMOORA method: Application to single-point mooring system. Applied Soft Computing, 132, 109841.
- [126] Zhang, Y., Yang, H., Han, D. (2024). A Knowledge Graph-Based Failure Information Fusion Method for Enhancing Reliability in Sustainable Systems. Sustainability, 16(23), 10651.
- [127] Goryunova, V. V., Goryunova, T. I., Lukinova, O. V. (2019, November). Integrated platform solutions and quality management in the planning and organization of production processes. In Journal of Physics: Conference Series (Vol. 1353, No. 1, p. 012121). IOP Publishing.
- [128] Lari, A. (2002). An integrated information system for quality management. Business process management journal, 8(2), 169-182.
- [129] Laskurain-Iturbe, I., Arana-Landín, G., Heras-Saizarbitoria, I., Boiral, O. (2021). How does IATF 16949 add value to ISO 9001? An empirical study. Total Quality Management and Business Excellence, 32(11-12), 1341-1358.
- [130] Martins, Y. S., Sanches da Silva, C. E., Sampaio, P. A. D. C. A., Catalani Gabriel, L. (2022). ISO 9001: 2015 and risk-based thinking: scientific research insights. Total Quality Management and Business Excellence, 33(11-12), 1326-1343.
- [131] Chen, C. K., Anchecta, K., Lee, Y. D., Dahlgaard, J. J. (2016). A stepwise ISO-based TQM implementation approach using ISO 9001: 2015. Management and Production Engineering Review.

- [132] Zhemchugova, O., Levshina, V. (2020). The risk-based approach in organization quality management systems. *Revista galega de economía: Publicación Interdisciplinar da Facultade de Ciencias Económicas e Empresariais*, 29(3), 35-48.
- [133] Vasiliev, V. A., Aleksandrova, S. V., Aleksandrov, M. N., Velmakina, Y. V. (2020). Possibilities for the integration of quality management tools and methods with digital technologies. *Russian Metallurgy (Metally)*, 2020(13), 1649-1652.
- [134] Amran, M. M., Khairanum, S., Roslan, B. R., Ikbar, A. M., Anwar, A. F. (2019). Development of intelligent decision support system for selection of quality tools and techniques. *Int J Mach Learn Comput*, 9(6), 893-898.
- [135] Chesalin, A. N., Grodzenskiy, S. Y., Nilov, M. Y., Pham, V. T. (2020, May). Intelligent quality management tools for digital production and knowledge management system for their application. In *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering* (Vol. 862, No. 4, p. 042032). IOP Publishing.
- [136] Holmes, K. (2009). Planning to teach with digital tools: Introducing the interactive whiteboard to pre-service secondary mathematics teachers. *Australasian Journal of Educational Technology*, 25(3).
- [137] Ramzaev, V. M., Khaimovich, I. N., Martynov, I. V. (2019). Methods for finding shortest paths on graphs in organizational and economic systems and their implementation. In *V International Conference and Youth School "Information Technologies and Nanotechnologies" (ITNT-2019)* (pp. 1-8).
- [138] Chang, S. I., Ghafariasl, P. (2025). A Review of Artificial Intelligence Impacting Statistical Process Monitoring and Future Directions. *arXiv preprint arXiv:2503.01858*.
- [139] Ouedraogo, E. B., Hawbani, A., Wang, X., Liu, Z., Zhao, L., Al-qaness, M. A., Alsamhi, S. H. (2025). Digital Twin Data Management: A Comprehensive Review. *IEEE Transactions on Big Data*.
- [140] Burggraef, P., Wagner, J., Heinbach, B., Steinberg, F., Schmallenbach, L., Garcke, J., ... and Wolter, M. (2021). Predictive analytics in quality assurance for assembly processes: lessons learned from a case study at an industry 4.0 demonstration cell. *Procedia CIRP*, 104, 641-646.
- [141] Määtä, K. (2022). Production part approval process (PPAP) framework integration into product development process.
- [142] Bamford, D. R., Greatbanks, R. W. (2005). The use of quality management tools and techniques: a study of application in everyday situations. *International Journal of Quality and Reliability Management*, 22(4), 376-392.
- [143] Bunney, H. S., Dale, B. G. (1997). The implementation of quality management tools and techniques: a study. *The TQM magazine*, 9(3), 183-189.
- [144] Dale, B., Boaden, R., Wilcox, M., McQuater, R. (1998). The use of quality management techniques and tools: an examination of some key issues. *International Journal of Technology Management*, 16(4-6), 305-325.
- [145] Tallentire, V. R., Harley, C. A., Watson, S. (2019). Quality planning for impactful improvement: a mixed methods review. *BMJ open quality*, 8(4).
- [146] Moura e Sá, P. (2024). Analysing the use of mixed methods in quality management literature. *The TQM Journal*, 36(8), 2676-2692.
- [147] Tarí, J. J., Sabater, V. (2004). Quality tools and techniques: are they necessary for quality management?. *International journal of production economics*, 92(3), 267-280.
- [148] Rath, F. (2008). Tools for developing a quality management program: proactive tools (process mapping, value stream mapping, fault tree analysis, failure mode and effects analysis). *International Journal of Radiation Oncology* Biology* Physics*, 71(1), S187-S190.
- [149] Frąś, J., Frąś, T., Frąś, M. (2017). Model instrumentów zarządzania jakością w procesach produkcyjnych. *Problemy Nauk Stosowanych*, 6.
- [150] Frąś, J., Siwkowski, M. (2011). Metody i techniki zarządzania jakością. *Zeszyty naukowe uniwersytetu szczecińskiego. Finanse, rynki finansowe, ubezpieczenia*, (46), 369-380.

- [151] Łuczak, J. (2011). Wykorzystanie metod i technik zarządzania jakością dla zapewnienia satysfakcji klientów na przykładzie dostawców z branży motoryzacyjnej. *Prace Naukowe Uniwersytetu Ekonomicznego we Wrocławiu*, (151), 420-429.
- [152] Lisiecka, K. (2013). Systemy zarządzania jakością produktów. Metody analizy i oceny. *Prace Naukowe/Uniwersytet Ekonomiczny w Katowicach*.
- [153] Penc-Pietrzak, I. (2010). Planowanie strategiczne w nowoczesnej firmie. Wolters Kluwer.
- [154] Zapłata, S. (2009). Zarządzanie jakością w przedsiębiorstwie: Ocena i uwarunkowania skuteczności. Wolters Kluwer.
- [155] Dahlgaard, J. J., Reyes, L., Chen, C. K., Dahlgaard-Park, S. M. (2019). Evolution and future of total quality management: management control and organisational learning. *Total quality management and business excellence*, 30(sup1), S1-S16.
- [156] Bolatan, G. I. S., Golgeci, I., Arslan, A., Tatoglu, E., Zaim, S., Gozlu, S. (2022). Unlocking the relationships between strategic planning, leadership and technology transfer competence: the mediating role of strategic quality management. *Journal of Knowledge Management*, 26(11), 89-113.
- [157] Fonseca, L. (2022). The EFQM 2020 model. A theoretical and critical review. *Total Quality Management and Business Excellence*, 33(9-10), 1011-1038.
- [158] Ouazzani-Chahidi, A., Abdellatif, L., Jimenez, J. F., Berrah, L. (2023). Maturity levels of management process for improving industrial performance. *Scientific African*, 21, e01852.
- [159] Sharan, K., Dhayanithy, D., Sethi, D. (2023). Interrelationship between strategic factors, technology and organizational learning: a systematic literature review. *Journal of Knowledge Management*, 27(9), 2462-2483.
- [160] Grycuk, A. (2010). Kluczowe wskaźniki efektywności (KPI) jako narzędzie doskonalenia efektywności operacyjnej firm produkcyjnych zorientowanych na lean. *Przegląd organizacji*, (2), 28-31.
- [161] Dipura, S., Soediantono, D. (2022). Benefits of key performance indicators (KPI) and proposed applications in the defense industry: a literature review. *International Journal of Social and Management Studies*, 3(4), 23-33.
- [162] Yip, A. W., Yu, W. Y. (2023). The quality of environmental KPI disclosure in ESG reporting for SMEs in Hong Kong. *Sustainability*, 15(4), 3634.
- [163] Czerwińska, K., Pacana, A. (2020). Kluczowe wskaźniki efektywności (KPI). *Management and Quality–Zarządzanie i Jakość*, 2(1).
- [164] Grabowska, S. (2017). Kluczowe wskaźniki efektywności–studium przypadku. *Zeszyty Naukowe. Organizacja i Zarządzanie/Politechnika Śląska*.
- [165] Bednarska, P., Bożek, Ł., Kola, K., Nadolna, K., Tarczoń, A. (2022). System KPI do monitorowania dostawców dla zrównoważonego łańcucha dostaw. *Zeszyty Studenckie Wydziału Ekonomicznego „Nasze Studia”*, (12), 83-94.
- [166] Zbierowski, P. (2011). Kluczowe wskaźniki efektywności w perspektywie procesowej. *Prace Naukowe Uniwersytetu Ekonomicznego we Wrocławiu*, 169, 315-322.
- [167] Walaszczyk, A., Błaszczuk, M. (2013). Wskaźniki monitorowania procesów–studium przypadku. *Zeszyty Naukowe Politechniki Łódzkiej, Organizacja i Zarządzanie*, 56(1184), 89-103.
- [168] Zając, S., Kudła, B. (2016). Ocena wdrożenia oraz wykorzystania metod, narzędzi i technik zarządzania jakością w przedsiębiorstwach w województwie podkarpackim. *Prace naukowo-dydaktyczne, zeszyt*, 70, 359-383.
- [169] Górka, M. (2024). Wykorzystanie metod i narzędzi zarządzania jakością w przedsiębiorstwie na przykładzie firmy odzieżowej. *Ekonomika i Organizacja Logistyki*, 9(3), 71-90.
- [170] Łukasiński, W. (2012). Wpływ zarządzania jakością na proces doskonalenia organizacji. *Zeszyty Naukowe Uniwersytetu Ekonomicznego w Krakowie*, 881(05), 93-106.

Normy, standardy i podręczniki branżowe

- [1S] International Organization for Standardization. (2015). ISO 9001:2015 Quality management systems—Requirements. Geneva: ISO.
- [2S] International Automotive Task Force. (2016). IATF 16949:2016—Quality management system requirements for automotive production and relevant service parts organizations.
- [3S] AIAG & VDA. (2019). FMEA Handbook—Design and Process Failure Mode and Effects Analysis. Southfield, MI: AIAG.
- [4S] Automotive Industry Action Group. (2024). Advanced Product Quality Planning (APQP) (3rd ed.). Southfield, MI: AIAG.
- [5S] Automotive Industry Action Group. (2024). Control Plan (1st ed.). Southfield, MI: AIAG.
- [6S] Automotive Industry Action Group. (2006). Production Part Approval Process (PPAP) (4th ed.). Southfield, MI: AIAG.
- [7S] Verband der Automobilindustrie (VDA), Quality Management Center (QMC). (2022). *Maturity Level Assurance for New Parts* (3rd ed.). Berlin: VDA QMC.
- [8S] Automotive Industry Action Group.. (2010). Measurement Systems Analysis (MSA). 4th ed. Southfield, MI: AIAG.
- [9S] Automotive Industry Action Group. (2005). Statistical Process Control (SPC). 2nd ed. Southfield, MI: AIAG.
- [10S] International Organization for Standardization. (2018). ISO 26262 Road vehicles—Functional safety (2nd ed.). Geneva: ISO.

Strony internetowe

- [1W] <https://www.monroeridesolutions.com/intelligentsuspension/>
- [2W] <https://monroe.com.au/what-are-shocks/shock-absorbers-explained>
- [3W] <https://pq-fmea.pl/>
- [4W] <https://www.apis-iq.cn/en/software/products/>
- [5W] <https://www.peakavenue.com/software/plato-fmea-software>
- [6W] <https://www.iatfglobaloversight.org/oem-requirements/customer-specific-requirements/>

Spis rysunków

Rysunek 2.2.1. Model APQP – powiązania pomiędzy głównymi fazami planowania jakości (opracowanie własne na podstawie 4S)	26
Rysunek 2.2.2. Schemat zależności pomiędzy fazami APQP a elementami PPAP (opracowanie własne bazujące na standardach branżowych [1S- 9S, 10S])	35
Rysunek 2.2.3. Schemat zależności pomiędzy fazami APQP a elementami PPAP (opracowanie własne bazujące na standardach branżowych [1S- 9S, 10S])	36
Rysunek 2.2.4. Model planowania jakości w procesie rozwoju i industrializacji produktu- perspektywa organizacji Tier 1 (opracowanie własne bazujące na [4S])	39
Rysunek 3.1.1 Dekompozycja hipotezy badawczej w formie diagramu żółwia (opracowanie własne)	62
Rysunek 3.2.1.1. Uproszczony schemat układu hydraulicznego systemu KINETIC z widokiem z góry pojazdu [1W]	66
Rysunek 3.2.1.2. Przykład amortyzatorów będących częścią systemu Kinetic wraz z elementami pomocniczymi (opracowanie własne bazujące na [1W])	66

Rysunek 3.2.1.3. Ilustracja podstawowych kierunków ruchu nadwozia: pionowy (isolation), przód–tył (pitch), boczny (roll) [1W]	68
Rysunek 3.2.1.4. Przykład amortyzatorów konwencjonalnych oraz ich umiejscowienie w samochodzie (opracowanie własne bazując na [2W])	69
Rysunek 3.2.1.5. Wykres porównawczy charakterystyk tłumienia - stała krzywa dla amortyzatora konwencjonalnego vs zakres regulacji dla amortyzatora sterowanego elektronicznie (siła tłumienia vs prędkość tłoczyska amortyzatora) (opracowanie własne bazując na [1W- 2W])	69
Rysunek 3.2.1.6. Przykładowa liczba elementów występujących w zawieszeniu konwencjonalnym oraz systemie KINETIC (opracowanie własne)	70
Rysunek 3.2.1.7. Liczba komponentów w zestawieniu BOM – amortyzatory konwencjonalne i sterowane elektronicznie (opracowanie własne)	73
Rysunek 3.2.2.1. Zależność średniej wartości wskaźnika RPN od średniej wartości liczby komponentów dla amortyzatorów konwencjonalnych i sterowanych elektronicznie (opracowanie własne)	74
Rysunek 3.2.2.2. Zależność średniej wartości liczby charakterystyk znaczących od średniej wartości liczby komponentów dla amortyzatorów konwencjonalnych i sterowanych elektronicznie (opracowanie własne)	75
Rysunek 3.2.3.1. Porównanie standardowego modelu APQP z systemem Ten PLUS stosowanym w Tenneco (opracowanie własne na podstawie APQP i Ten PLUS)	76
Rysunek 3.2.3.2. Umiejscowienie procesu DMSO w strukturze TenPLUS oraz jego powiązanie z Technical Review (opracowanie własne na podstawie Ten PLUS)	78
Rysunek 3.3.1. Liczba niezgodności w poszczególnych fazach planowania jakości (Ten PLUS) dla amortyzatorów sterowanych elektronicznie z zaznaczoną linią trendu (opracowanie własne)	82
Rysunek 3.3.2. Analiza Pareto niezgodności według kategorii RYG z podziałem na strefy A, B i C dla amortyzatorów sterowanych elektronicznie (opracowanie własne)	83
Rysunek 3.3.3. Liczba niezgodności w poszczególnych fazach planowania jakości (Ten PLUS) dla amortyzatorów konwencjonalnych z zaznaczoną linią trendu (opracowanie własne)	85
Rysunek 3.3.4. Analiza Pareto niezgodności według kategorii RYG z podziałem na strefy A, B i C dla amortyzatorów konwencjonalnych (opracowanie własne)	86
Rysunek 3.3.5. Porównanie średniej wartości liczby niezgodności na projekt w poszczególnych fazach planowania jakości (Ten PLUS) dla amortyzatorów konwencjonalnych i sterowanych elektronicznie z zaznaczoną linią trendu (opracowanie własne)	87
Rysunek 3.3.6. Udział procentowy niezgodności w poszczególnych kategoriach niezgodności RYG dla amortyzatorów konwencjonalnych i sterowanych elektronicznie (opracowanie własne)	88
Rysunek 3.7.1. Integracja opracowanych instrumentów planowania jakości w procesie rozwoju produktu (opracowanie własne)	96
Rysunek 3.7.1.1 Umiejscowienie Design Review w procesie planowania jakości produktu i procesu wg APQP oraz Ten PLUS (opracowanie własne bazujące na APQP i Ten PLUS)	99
Rysunek 3.7.1.2. Mapa procesu Design Review 2.0 (opracowanie własne)	101
Rysunek 3.7.2.1. Zawartość arkusza Design Review Output File (opracowanie własne)	103
Rysunek 3.7.3.1 Oś czasu rozwoju narzędzia „Design Review” (opracowanie własne)	107
Rysunek 3.7.4.1 Liczba niezgodności w poszczególnych fazach planowania jakości – walidacja DR 1.0 (opracowanie własne)	110
Rysunek 3.7.4.2. Liczba i poziom znaczenia niezgodności vs. fazy planowania jakości – walidacja DR 1.0, kryteria oceny niezgodności wg tabeli 3.7.2.2 (opracowanie własne)	111
Rysunek 3.7.4.3. Analiza Pareto kategorii niezgodności zidentyfikowanych podczas walidacji Design Review 1.0, oznaczenia N1–N10 zgodnie z tabelą 3.7.4.1 (opracowanie własne)	113
Rysunek 3.7.4.4. Analiza Pareto kategorii niezgodności występujących w fazie projektowania i rozwoju produktu podczas walidacji DR 1.0, oznaczenia N1–N10 zgodnie z tabelą 3.7.4.1 (opracowanie własne)	114

Rysunek 3.7.4.5. Analiza Pareto kategorii niezgodności występujących w fazie walidowania produktu i rozwoju procesu podczas walidacji DR 1.0, oznaczenia N1–N10 zgodnie z tabelą 3.7.4.1 (opracowanie własne)	115
Rysunek 3.7.4.6. Liczba niezgodności w poszczególnych fazach planowania jakości – pełne wdrożenie DR 1.0 (opracowanie własne)	116
Rysunek 3.7.4.7. Liczba i poziom znaczenia niezgodności vs. fazy planowania jakości – pełne wdrożenie DR 1.0 (opracowanie własne)	117
Rysunek 3.7.4.8. Analiza Pareto kategorii niezgodności zidentyfikowanych podczas pełnego wdrożenia DR 1.0, oznaczenia N1–N10 zgodnie z tabelą 3.7.4.1 (opracowanie własne)	118
Rysunek 3.7.4.9. Analiza Pareto kategorii niezgodności występujących w fazie rozwoju produktu podczas pełnego wdrożenia DR 1.0, – oznaczenia N1–N10 zgodnie z tabelą 3.7.4.1 (opracowanie własne)	119
Rysunek 3.7.4.10. Analiza Pareto kategorii niezgodności występujących w fazie walidowania produktu i rozwoju procesu podczas pełnego wdrożenia DR 1.0, – oznaczenia N1–N10 zgodnie z tabelą 3.7.4.1 (opracowanie własne)	120
Rysunek 3.7.4.11. Liczba niezgodności w poszczególnych fazach planowania jakości – DR 2.0 (opracowanie własne)	121
Rysunek 3.7.4.12. Liczba i poziom niezgodności vs. fazy planowania jakości – DR 2.0 (opracowanie własne)	122
Rysunek 3.7.4.13. Analiza Pareto kategorii niezgodności zidentyfikowanych podczas użycia DR 2.0, – oznaczenia N1–N10 zgodnie z tabelą 3.7.4.1 (opracowanie własne)	123
Rysunek 3.7.4.14. Analiza Pareto kategorii niezgodności występujących w fazie planowania projektu – DR 2.0, – oznaczenia N1–N10 zgodnie z tabelą 3.7.4.1 (opracowanie własne)	124
Rysunek 3.7.4.15. Analiza Pareto kategorii niezgodności występujących w fazie rozwoju produktu – DR 2.0, – oznaczenia N1–N10 zgodnie z tabelą 3.7.4.1 (opracowanie własne)	125
Rysunek 3.7.4.16. Analiza Pareto kategorii niezgodności występujących w fazie walidacji produktu i rozwoju procesu – DR 2.0, – oznaczenia N1–N10 zgodnie z tabelą 3.7.4.1 (opracowanie własne)	126
Rysunek 3.7.4.17. Liczba niezgodności w poszczególnych fazach planowania jakości dla amortyzatorów konwencjonalnych – DR 2.0 (opracowanie własne)	127
Rysunek 3.7.4.18. Liczba i poziom znaczenia niezgodności vs. fazy planowania jakości dla amortyzatorów konwencjonalnych – DR 2.0 (opracowanie własne)	128
Rysunek 3.7.4.19. Analiza Pareto niezgodności dla amortyzatorów konwencjonalnych – DR 2.0, – oznaczenia N1–N10 zgodnie z tabelą 3.7.4.1 (opracowanie własne)	129
Rysunek 3.7.4.20. Analiza Pareto kategorii niezgodności występujących w fazie planowania projektu dla amortyzatorów konwencjonalnych – DR 2.0, oznaczenia N1–N10 zgodnie z tabelą 3.7.4.1 (opracowanie własne)	130
Rysunek 3.7.4.21. Analiza Pareto kategorii niezgodności występujących w fazie rozwoju produktu dla amortyzatorów konwencjonalnych – DR 2.0, oznaczenia N1–N10 zgodnie z tabelą 3.7.4.1 (opracowanie własne)	131
Rysunek 3.7.5.1 Integracja Problem Definition Tool (PDT) w procesie planowania jakości (opracowanie własne)	136
Rysunek 3.7.6.1. Struktura formularza Problem Definition Tool (PDT) (opracowanie własne)	138
Rysunek 3.7.7.1. Ilość przeprowadzonych iteracji od zaistnienia niezgodności do spotkania zamykającego (opracowanie własne)	142
Rysunek 3.7.7.2. Kompletność wypełnienia formularza PDT, punktacja od 0-7 (opracowanie własne)	143
Rysunek 3.7.7.3. Liczba braków wypełnienia dla poszczególnych obszarów w formularzu PDT (opracowanie własne)	145
Rysunek 3.7.7.4. Liczba iteracji wykorzystania formularza PDT dla danej niezgodności vs jej RPN (opracowanie własne)	146

Rysunek 3.7.7.5. Liczba iteracji wykorzystania formularza PDT dla danej niezgodności vs jej Severity (opracowanie własne)	147
Rysunek 3.7.8.1. Umieszczenie Technical Review w procesie planowania jakości produktu i procesu wg APQP oraz Ten PLUS	151
Rysunek 3.7.9.1. Struktura arkusza Technical Review wraz z opisem poszczególnych sekcji (opracowanie własne)	153
Rysunek 3.7.10.1. Liczba i poziom znaczenia niezgodności podczas etapu walidowania instrumentu Technical Review (opracowanie własne)	161
Rysunek 3.7.10.2. Analiza Pareto niezgodności, walidacja Technical Review (opracowanie własne)	162
Rysunek 3.7.10.3. Liczba niezgodności vs ilość przeanalizowanych projektów w poszczególnych fazach planowania jakości – pełne wdrożenie Technical Review (opracowanie własne)	163
Rysunek 3.7.10.4. Liczba i poziom znaczenia niezgodności vs. fazy planowania jakości – pełne wdrożenie Technical Review (opracowanie własne)	164
Rysunek 3.7.10.5. Analiza Pareto niezgodności – pełne wdrożenie Technical Review (opracowanie własne)	165
Rysunek 3.7.10.6. Analiza Pareto kategorii niezgodności występujących w fazie planowania projektu- pełne wdrożenie Technical Review (opracowanie własne)	167
Rysunek 3.7.10.7. Analiza Pareto kategorii niezgodności występujących w fazie rozwoju produktu - pełne wdrożenie Technical Review (opracowanie własne)	168
Rysunek 3.7.9.8. Analiza Pareto kategorii niezgodności występujących w fazie walidowania produktu i rozwoju procesu - pełne wdrożenie Technical Review (opracowanie własne)	169
Rysunek 4.1.1. Średnia wartość liczby niezgodności w kolejnych etapach wdrożenia Design Review (opracowanie własne)	171
Rysunek 4.1.2. Średnia liczba niezgodności na projekt z podziałem na fazy planowania jakości dla kolejnych etapów wdrożenia Design Review (opracowanie własne)	172
Rysunek 4.1.3. Średnia wartość liczby niezgodności według poziomu znaczenia i fazy projektu – porównanie walidacji i pełnego wdrożenia DR 1.0 (opracowanie własne)	173
Rysunek 4.1.4. Średnia wartość liczby niezgodności według poziomu znaczenia i fazy projektu – porównanie DR 1.0 i DR 2.0 (opracowanie własne)	174
Rysunek 4.1.5. Udział procentowy niezgodności w poszczególnych etapach wdrażania Design Review z podziałem na kategorie N1–N10	175
Rysunek 4.1.6. Średnia wartość liczby niezgodności w projektach dla poszczególnych etapów wdrożenia Design Review (opracowanie własne)	177
Rysunek 4.1.7. Udział procentowy średniej liczby niezgodności według poziomu w projektach analizowanych w poszczególnych etapach wdrożenia Design Review (opracowanie własne)	178
Rysunek 4.1.8. Udział procentowy niezgodności w poszczególnych kategoriach dla etapów wdrożenia Design Review (N1–N10) (opracowanie własne)	179
Rysunek 4.2.1. Zależność liczby iteracji od stopnia wypełnienia formularza PDT w poszczególnych kategoriach niezgodności- kolor niebieski niezgodności trwale wyeliminowane, kolor czerwony oznacza niezgodności występujące powtórnie (opracowanie własne)	183
Rysunek 4.2.2. Zależność pomiędzy liczbą iteracji a wartością liczby kryterialnej Severity, dla wszystkich analizowanych niezgodności (opracowanie własne)	184
Rysunek 4.2.3. Zależność liczby iteracji od wartości wskaźnika RPN (opracowanie własne)	185
Rysunek 4.2.4. Kompletność wypełnienia formularza PDT od wartości wskaźnika RPN (opracowanie własne)	186
Rysunek 4.3.1. Średnia wartość liczby niezgodności dla poszczególnych poziomów znaczenia niezgodności – etap walidowania instrumentu Technical Review (opracowanie własne)	188
Rysunek 4.3.2. Średnia wartość liczby niezgodności dla poszczególnych kategorii niezgodności na etapie walidacji instrumentu Technical Review (opracowanie własne)	188

Rysunek 4.3.3. Średnia liczba niezgodności na projekt w poszczególnych fazach planowania jakości – porównanie etapu walidacji i pełnego wdrożenia Technical Review (opracowanie własne)	189
Rysunek 4.3.4. Udział procentowy niezgodności w poszczególnych kategoriach – porównanie etapu walidacji i pełnego wdrożenia Technical Review (opracowanie własne)	190
Rysunek 4.3.5. Udział procentowy niezgodności w poszczególnych fazach planowania jakości z podziałem na kategorie – etap pełnego wdrożenia Technical Review (opracowanie własne)	191
Rysunku 4.4.1. Średnia wartość liczby eskalacji na projekt dla poszczególnych faz planowania jakości (opracowanie własne)	193
Rysunek 4.4.2. Średnia liczba niezgodności w poszczególnych kategoriach RYG, przed i po wdrożeniu opracowanych instrumentów planowania jakości (opracowanie własne)	194

Spis tabel

Tabela 2.1.1. Kluczowe kierunki ewolucji podejścia do planowania jakości w ujęciu historycznym (opracowanie własne na podstawie [84- 86])	20
Tabela 2.1.2. Kontekst rozwoju i kluczowe czynniki ewolucji procesu planowania jakości (opracowanie własne na podstawie [87- 88])	22
Tabela 2.1.3. Perspektywy rozwoju planowania jakości do 2030 roku (opracowanie własne na podstawie [89- 93])	23
Tabela 2.2.1. Charakterystyka faz APQP i ich wpływ na planowanie jakości (opracowanie własne na podstawie [4S])	27
Tabela 2.2.2. Rozszerzona charakterystyka metodyki APQP w odniesieniu do kluczowych kryteriów planowania jakości (opracowanie własne [95, 4S- 5S])	29
Tabela 2.2.3. Wymagania dotyczące dokumentacji w procesie PPAP a faza APQP (opracowanie własne na podstawie [6S, 98])	31
Tabela 2.2.4. Porównanie podejścia do FMEA zawartego w podręczniku AIAG FMEA edycja czwarta z roku 2008 z podręcznikiem wydanym przez AIAG i VDA w roku 2019 (opracowanie własne bazując na 3S)	34
Tabela 2.2.5. Etapy projektu w odniesieniu do faz APQP – charakterystyka, wejścia i wyjścia (opracowanie własne bazujące na [4S])	41
Tabela 2.2.6. Projektowanie współbieżne w procesie APQP (opracowanie własne bazujące na [4S])	42
Tabela 2.2.7. Kryteria identyfikacji elementów krytycznych w planowaniu jakości (Tier 1) (opracowanie własne)	43
Tabela 2.2.8. Uzasadnienie krytyczności poszczególnych etapów (odniesienie do modelu z rysunku 2.2.3) – opracowanie własne	45
Tabela 2.2.9. Porównanie realizacji krytycznych etapów planowania jakości dla produktów prostych i złożonych (przykład: produkt mechatroniczny) - opracowanie własne	46
Tabela 2.3.1. Charakterystyka środowisk informatycznych do analizy FMEA według poziomu zaawansowania (opracowanie własne bazujące na [3W- 5W])	49
Tabela 2.3.2. Propozycja kryteriów oceny środowisk FMEA (opracowanie własne)	50
Tabela 2.4.1. Przykłady instrumentów planowania jakości przypisanych do poszczególnych etapów procesu planowania jakości (opracowanie własne bazujące na [145- 146])	53
Tabela 3.1.1. Zestawienie celów badawczych – pytań badawczych – wskaźniki (opracowanie własne)	64
Tabela 3.2.1.1. Zestawienie znaczenia i symboli charakterystyk specjalnych (opracowanie własne)	71
Tabela 3.2.1.2. Zestawienie liczby charakterystyk specjalnych dla analizowanych typów amortyzatorów (opracowanie własne)	72
Tabela 3.3.1. Kategorie i podkategorie niezgodności w procesie eskalacji RYG, związane z wystąpieniem niezgodności (opracowanie własne)	80

Tabela 3.3.2. Liczba niezgodności w poszczególnych fazach planowania jakości (Ten PLUS) dla amortyzatorów sterowanych elektronicznie (opracowanie własne)	81
Tabela 3.3.3. Liczba niezgodności w poszczególnych fazach planowania jakości (Ten PLUS) dla amortyzatorów konwencjonalnych (opracowanie własne)	84
Tabela 3.6.1. Zakres i kamienie milowe badań (opracowanie własne)	94
Tabela 3.7.2.1. Wejścia i wyjścia procesu Design Review 2.0 (opracowanie własne)	102
Tabela 3.7.2.2. Kryteria oceny niezgodności w Design Review 1.0 (opracowanie własne)	105
Tabela 3.7.2.3. Kryteria oceny niezgodności w Design Review 2.0 (opracowanie własne)	
Tabela 3.7.4.1. Kategorie i podkategorie niezgodności w dokumentacji technicznej wraz z przypisanymi symbolami N1–N10 (opracowanie własne)	109
Tabela 3.7.6.1. Powiązanie elementów obszaru 4- 'Monitorowanie postępów' formularza PDT z etapami analizy 8D (opracowanie własne)	140
Tabela 3.7.7.1. Braki w uzupełnieniu poszczególnych obszarów formularza PDT, w odniesieniu do rys. 3.7.6.1	144
Tabela 3.7.7.2. Identyfikacja przyczyn źródłowych braków w uzupełnianiu obszarów formularza PDT (Rysunek 3.7.6.1) dla poszczególnych niezgodności (opracowanie własne)	148
Tabela 3.7.9.1. Tematy podlegające ocenie w ramach Technical Review (opracowanie własne)	155
Tabela 3.7.9.2. Pytania pomocnicze stosowane w Technical Review dla obszaru Specyfikacji wymagań klienta (opracowanie własne)	157
Tabela 3.7.10.1. Klasyfikacja niezgodności w Technical Review, przejście z kategorii niezgodności występujących w R/Y/G do kategorii niezgodności Technical Review (opracowanie własne)	159
Tabela 3.7.10.2. Kryteria oceny niezgodności z Technical Review (takie same jak w Design Review)	160
Tabela 4.2.1. Wartości średnie i odchylenia standardowe wskaźników oceny skuteczności narzędzia Problem Definition Tool (PDT) dla niezgodności trwale usuniętych (opracowanie własne)	181
Tabela 4.2.2. Wartości średnie i odchylenia standardowe wskaźników oceny skuteczności narzędzia Problem Definition Tool (PDT) dla niezgodności, które powtórnie wystąpiły przed upływem 24 miesięcy (opracowanie własne)	181
Tabela 4.3.1. Dominujące kategorie niezgodności w pełnym wdrożeniu Technical Review wraz z przykładowymi podkategoriami (opracowanie własne)	192
Tabela 4.4.1. Cele zastosowania, weryfikacja skuteczności oraz wyniki oceny wdrożonych instrumentów planowania jakości (opracowanie własne)	196