

INSTYTUT TECHNOLOGII MASZYN I AUTOMATYZACJI
POLITECHNIKI WROCŁAWSKIEJ

Na prawach rękopisu

Monika OLEJNIK

**METODYKA REDUKCJI ZMIENNOŚCI
WŁAŚCIWOŚCI JAKOŚCIOWYCH
WYROBÓW
W PROCESACH OBRÓBKI
SKRAWANIEM**

Praca doktorska

*Słowa kluczowe: redukcja zmienności, obróbka skrawaniem,
zarządzanie jakością, metodyka*

Promotor: Prof. dr hab. inż. Tomasz Koch

Wrocław 2009

*Dziękuję firmie Sauer-Danfoss sp. z o. o. we Wrocławiu
za umożliwienie przeprowadzenia badań,
będących częścią tej pracy.*

*Praca ta nie powstałaby
bez inspiracji, życzliwości i wsparcia wielu osób.
Wszystkim Im serdecznie dziękuję.*

Monika Olejnik

SPIS TREŚCI

1. WSTĘP.....	5
1.1. Wprowadzenie.....	5
1.2. Uzasadnienie podjęcia tematu.....	8
1.2.1 Budowanie wiedzy procesowej.....	8
1.2.2. Doskonalenie procesów w podejściu związanym z teorią technologii procesów.....	9
1.2.3. Doskonalenie procesów w podejściu związanym z Zarządzaniem Jakością.....	10
1.3. Zidentyfikowana luka poznawcza.....	11
1.4. Teza, cel i zakres pracy.....	14
2. PROBLEM ZMIENNOŚCI W PROCESACH OBRÓBK SKRAWANIEM.....	16
2.1. Obszar pracy – obróbka skrawaniem.....	16
2.2. Zmienność w procesach obróbki skrawaniem – błędy obróbki.....	18
2.3. Przyczyny błędów obróbki w procesach obróbki skrawaniem.....	20
2.3.1. Przyczyny błędów obróbki skrawaniem wynikające z błędów obrabiarki.....	20
2.3.2. Przyczyny błędów obróbki skrawaniem wynikające z błędów elementów układu OUPN.....	21
2.3.3. Przyczyny błędów obróbki skrawaniem wynikające z czynników oddziałujących na proces obróbki.....	21
2.3.4. Przyczyny błędów obróbki skrawaniem wynikające z oddziaływań statycznych i dynamicznych występujących w procesie obróbki.....	23
2.3.5. Przyczyny błędów obróbki w procesach obróbki skrawaniem – podsumowanie.....	25
2.4. Redukcja zmienności w procesach obróbki skrawaniem.....	25
2.4.1. Podejście polegające na analizie wpływu poszczególnych czynników na powstawanie błędów obróbki.....	27
2.4.2. Podejście polegające na modelowaniu wspólnego wpływu wielu czynników na powstawanie błędów obróbki.....	30
2.4.3. Podejście polegające na wskazywaniu potencjalnych przyczyn błędów obróbki, w oparciu o wiedzę teoretyczną.....	34
2.4.4. Redukcja zmienności w procesach obróbki skrawaniem – podsumowanie.....	36
3. ZMIENNOŚĆ PROCESÓW I JEJ REDUKCJA – PODEJŚCIE WYWODZĄCE SIĘ Z OBSZARU ZARZĄDZANIA JAKOŚCIĄ.....	37
3.1. Pojęcie zmienności procesu.....	37
3.1.1. Zmienność z przyczyn losowych a zmienność z przyczyn specjalnych.....	37
3.1.2. Postępowanie ze zmiennością z przyczyn specjalnych a postępowanie ze zmiennością z przyczyn losowych.....	41
3.1.3. Różne podejścia do redukcji zmienności naturalnej procesów.....	45
3.1.4. Głos Klienta a Głos Procesu.....	47
3.1.5. Pojęcie zmienności procesu – podsumowanie.....	49
3.2. Sterowanie jakością on-line i off-line.....	50
3.3. Sposoby doskonalenia procesów.....	53
3.3.1. Cykl Shewharta (PDSA).....	54
3.3.2. Sposoby doskonalenia procesów – modele uniwersalne.....	55
3.3.3. Sposoby doskonalenia procesów – modele umożliwiające wybór odpowiedniej strategii redukcji zmienności procesu.....	56

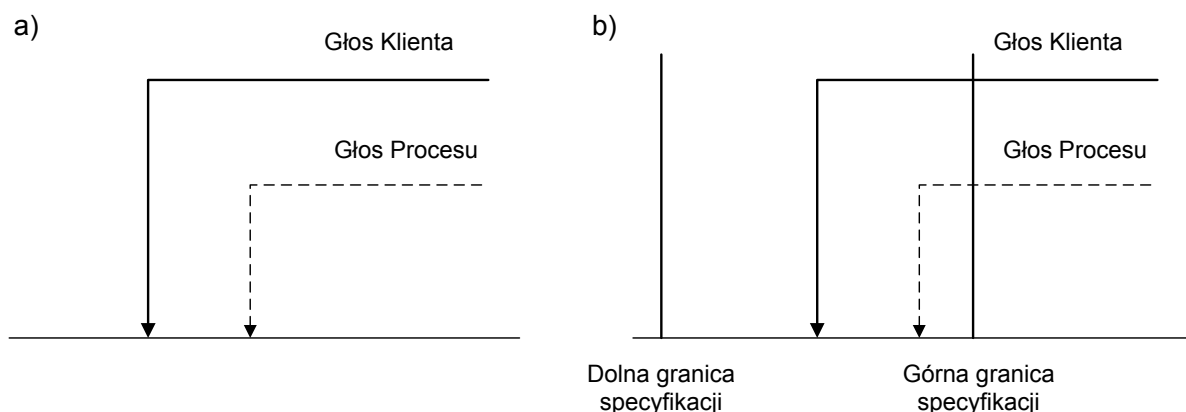
3.3.4. Sposoby doskonalenia procesów – modele ukierunkowane na redukcję naturalnej zmienności procesu.....	60
3.3.5. Sposoby doskonalenia procesów – podsumowanie.....	65
3.4. Metody, techniki i narzędzia wykorzystywane do redukcji zmienności procesów.....	65
3.4.1. Metody, techniki, narzędzia – terminologia.....	65
3.4.2. Dobór metod, technik i narzędzi doskonalenia.....	66
3.4.3. Klasyfikacje metod, technik i narzędzi doskonalenia – stosowane kryteria podziału.....	67
3.4.4. Zestawienie i wspólna klasyfikacja najczęściej stosowanych metod, technik i narzędzi doskonalenia.....	73
3.4.5. Metody, techniki i narzędzia wykorzystywane do redukcji zmienności procesów – podsumowanie.....	79
4. OPRACOWANA METODYKA REDUKCJI ZMIENNOŚCI PROCESÓW OBRÓBKII SKRAWANIEM.....	80
4.1. Wytyczne do opracowania metodyki.....	80
4.2. Podstawowe założenia opracowanej metodyki.....	80
4.3. Etap I: Wstępna charakterystyka sytuacji.....	83
4.4. Etap II: Szczegółowa analiza stanu procesu.....	84
4.5. Etap III: Analiza zmienności naturalnej procesu.....	87
4.5.1. Zestawienie potencjalnych przyczyn błędów obróbki skrawaniem.....	89
4.5.2. Wiedza ekspercka w opracowanej metodyce – system ekspertowy.....	91
4.5.3. Przygotowanie do analizy wpływu potencjalnych przyczyn na powstający błąd obróbki.....	96
4.5.4. Wstępna analiza wybranych potencjalnych przyczyn.....	98
4.5.5. Dalsza analiza prawdopodobnych przyczyn.....	99
4.6. Etap IV: Planowanie rozwiązania.....	100
4.7. Etap V: Wdrożenie rozwiązania.....	102
4.8. Opracowana <i>Metodyka redukcji zmienności procesów obróbki skrawaniem</i> – podsumowanie.....	105
5. PORÓWNANIE OPRACOWANEJ METODYKI REDUKCJI ZMIENNOŚCI PROCESÓW OBRÓBKII SKRAWANIEM Z PRZEBIEGIEM PROJEKTÓW DOSKONALĄCYCH PRZEPROWADZONYCH ZGODNIE Z INNYM ALGORYTMEM DOSKONALENIA.....	108
5.1. Projekt A.....	108
5.2. Projekt B.....	111
5.3. Porównanie opracowanej <i>Metodyki redukcji zmienności procesów obróbki skrawaniem</i> z przebiegiem projektów doskonalących przeprowadzonych zgodnie z innym algorytmem doskonalenia – podsumowanie.....	113
6. WERYFIKACJA OPRACOWANEJ METODYKI REDUKCJI ZMIENNOŚCI PROCESÓW OBRÓBKII SKRAWANIEM.....	115
6.1. Wstępna charakterystyka sytuacji.....	115
6.2. Szczegółowa analiza stanu procesu.....	116
6.2.1. Mapa procesu.....	116
6.2.2. Analiza danych historycznych.....	116
6.2.3. Plan zbierania danych, z uwzględnieniem strumieni produkcji.....	117
6.2.4. Analiza systemu pomiarowego.....	119

6.2.5. Zbieranie danych.....	121
6.2.6. Sprawdzenie „normalności” rozkładu danych.....	121
6.2.7. Sprawdzenie stabilności procesu, z uwzględnieniem strumieni produkcji.....	123
6.2.8. Analiza zdolności procesu, z uwzględnieniem strumieni produkcji.....	126
6.2.9. Określenie celu doskonalenia.....	129
6.3. Analiza zmienności naturalnej procesu.....	129
6.3.1. Identyfikacja potencjalnych przyczyn.....	129
6.3.2. Określenie sposobów sprawdzenia wpływu potencjalnych przyczyn na powstający błąd obróbki.....	131
6.3.3. Zebranie dodatkowych danych.....	133
6.3.4. Ponowne sprawdzenie stabilności procesu, z uwzględnieniem strumieni produkcji.....	139
6.3.5. Wstępna analiza wybranych potencjalnych przyczyn.....	142
6.3.6. Dalsza analiza prawdopodobnych przyczyn.....	162
6.4. Planowanie rozwiązania.....	165
6.4.1. Generowanie rozwiązań.....	165
6.4.2. Wybór rozwiązania.....	166
6.4.3. Weryfikacja rozwiązania.....	166
6.5. Wdrożenie rozwiązania.....	175
6.6. Weryfikacja opracowanej <i>Metodyki redukcji zmienności procesów obróbki</i> <i>skrawaniem</i> – podsumowanie.....	176
7. PODSUMOWANIE I WNIOSKI.....	177
Literatura.....	180
Załącznik A	
Załącznik B	

1. WSTĘP

1.1. Wprowadzenie

Przedsiębiorstwa produkcyjne, w trosce o wysoką jakość wyrobów, podejmują wiele działań mających na celu doskonalenie swoich procesów. W celu monitorowania jakości produkowanych wyrobów kontroluje się ich wybrane charakterystyki. Weryfikacja jakości wyrobu polega przede wszystkim na sprawdzeniu czy spełnia on wymagania stawiane przez klienta. W przypadku cech wyrobu, które mogą zostać opisane w sposób ilościowy, sprawdzenie takie polega na porównywaniu wartości odpowiedniej charakterystyki wyjściowej procesu produkcyjnego (związanej z daną cechą wyrobu), którą nazwać można Głosem Procesu (ang. *Voice of the Process*, VOP) z wartością, jakiej wobec tej charakterystyki oczekuje klient – a więc z tzw. Głosem Klienta (ang. *Voice of the Customer*, VOC). Przy takiej weryfikacji, tylko osiągnięcie wielkości wyjściowej procesu równej co do wartości wymaganiom stawianym przez klienta mogłoby zostać uznane za akceptowalne, ponieważ tylko wtedy nastąpiłoby spełnienie wymagań klienta. W innym przypadku, wyrób musiałby zostać uznany za nieakceptowalny (Rysunek 1.1.a).



Rys.1.1. Porównanie Głosu Procesu z Głosem Klienta:

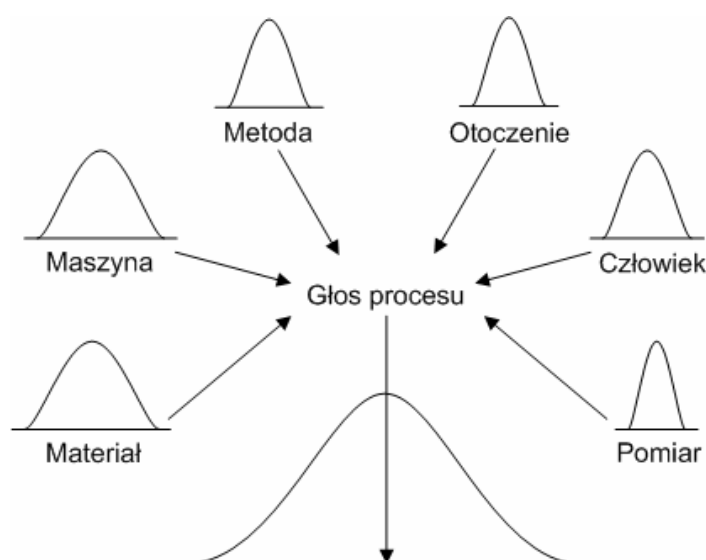
a) w ujęciu najprostszym

b) z uwzględnieniem granic specyfikacji

Źródło: opracowanie na podstawie Scherkenbach, 1991, s.15

W praktyce przemysłowej wymagania precyzowane są jednak z uwzględnieniem pewnych dopuszczalnych odchyłeń, które w warunkach rzeczywistych procesów są nieuniknione, a wynikać mogą z wielu różnych czynników oddziałujących na dany proces, takich jak np. zużycie narzędzia, wibracje maszyny, niejednorodność materiału, błędy operatorów, czy zmiany pogody. Nieuchronność tych czynników powoduje, że niemożliwe jest osiągnięcie za każdym razem tej samej wartości wielkości wyjściowej procesu. Aby zatem dostosować wymagania do realiów, takie nieuniknione odchylenia wartości charakteryzujących cechy wyrobu uwzględniane są poprzez określenie granic tolerancji, wyznaczających dopuszczalne odchylenie od nominalnej wartości – dotyczącej „kształtu, grubości, koloru, rozmiaru i innych parametrów” (Feigenbaum, 1991, s.347). Uwzględnienie dopuszczalnych odchyłeń powoduje, że – w ogólnym ujęciu – wszystkie wyroby, dla których wartości monitorowanych cech mieszczą się w przyjętych granicach specyfikacji, mogą być uważane za spełniające wymagania (Rysunek 1.1.b).

Często zdarza się, że z wymaganiami porównuje się średnią wartość mierzonej wielkości wyjściowej, uzyskaną w pewnym okresie czasu. Jednakże, w takich okolicznościach, nawet gdy porównywana wartość średnia mieści się w granicach specyfikacji – a więc spełnia wymagania, może zdarzyć się sytuacja, w której część uzyskanych wyników znajdzie się poza polem tolerancji. Dopiero przeanalizowanie całego Głosu Procesu, a nie tylko wybranej jego wartości, pozwoli w pełni poznać proces, aby można było dążyć do jego doskonalenia, tak aby Głos Procesu odpowiadał na Głos Klienta. Analizując Głos Procesu, trzeba wziąć pod uwagę jego zmienność, która, jak wspomniano wcześniej, może wynikać z wielu przyczyn. Przyczyny te, w ogólnym ujęciu, można zwykle przypisać do jednej z pięciu głównych kategorii, do których zalicza się czynniki związane z: metodą postępowania, wykorzystywaną maszyną i oprzyrządowaniem, stosowanym materiałem, człowiekiem oddziałującym na proces, oraz otoczeniem procesu, a także błędem wnoszonym przez system pomiarowy (Rysunek 1.2).

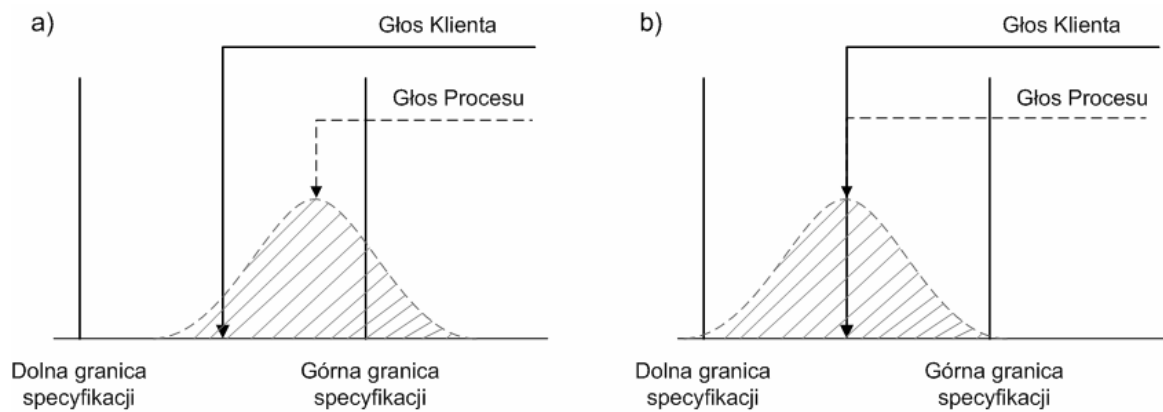


Rys.1.2. Źródła zmienności procesu

Źródło: na podstawie Scherkenbach, 1991, s.32

Dopiero pełna interpretacja Głosu Procesu, uwzględniająca jego zmienność, pozwala dokonać właściwej oceny spełnienia wymagań, ponieważ tylko w taki sposób możliwa jest, na podstawie porównania Głosu Procesu z Głosem Klienta, nie tylko ocena jednej wybranej z procesu wartości (reprezentującej często tylko jeden wyrób lub średnią wartość osiąganą w danym procesie), ale całego procesu w jego aktualnym stanie (Rysunek 1.3.a).

W sytuacji, gdy zbyt duża zmienność procesu powoduje, że część uzyskiwanych wartości nie mieści się w granicach specyfikacji (Rys.1.3.a), konieczne jest podjęcie działań, mających na celu sprawienie, aby proces spełniał wymagania klienta. Takim działaniem może być wprowadzenie 100% inspekcji i selekcji wyrobów nie spełniających wymagań, lub – gdy jest to możliwe i uzasadnione – próba zmiany tolerancji. Jednak w tego typu sytuacji wskazane są przede wszystkim działania skierowane na doskonalenie procesu. Z reguły w pierwszej kolejności podejmuje się próby wprowadzenia takich zmian w procesie, które umożliwią przesunięcie procesu w kierunku środka pola tolerancji.

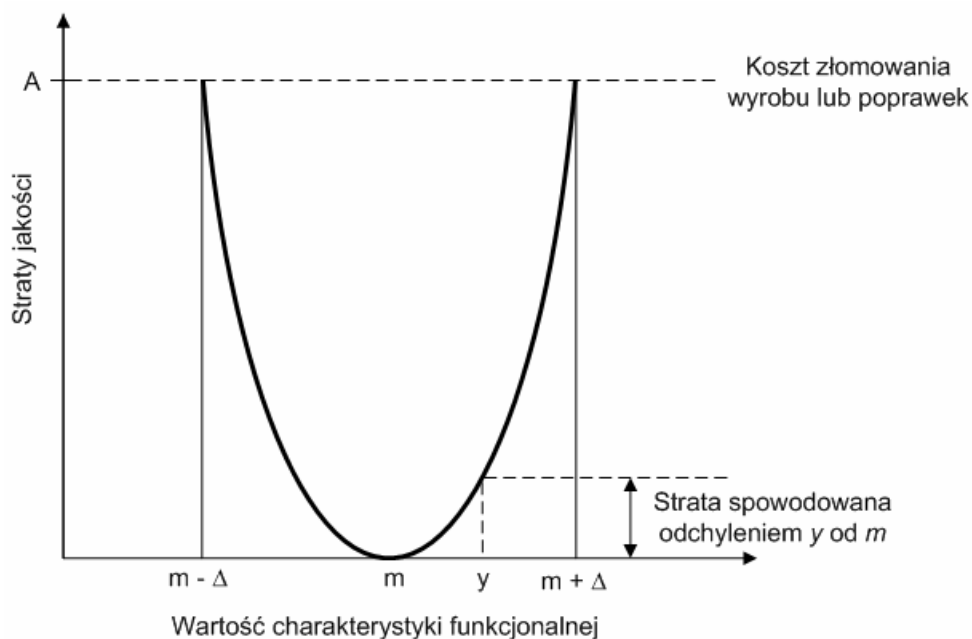


Rys.1.3. Porównanie Głosu Procesu z Głosem Klienta, z uwzględnieniem granic specyfikacji oraz zmienności procesu:

- a) przed poprawą
- b) po poprawie

Źródło: opracowanie własne

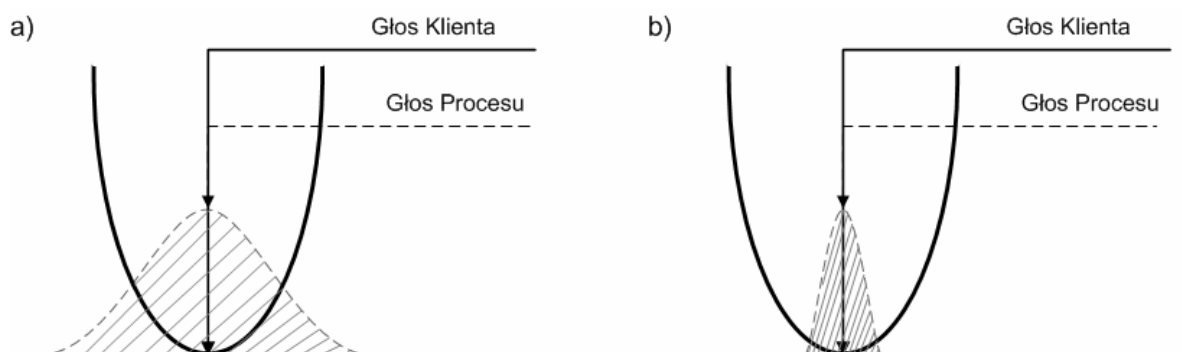
Jeśli takie działania przyniosą pozytywny skutek, a rozrzut procesu nie jest znacząco większy od pola tolerancji (Rysunek 1.3.b), przeprowadzone działania doskonalące zwykle uznaje się za zakończone sukcesem, a proces za spełniający wymagania. Przy takim podejściu, wszystkie wyniki procesu, mieszczące się w granicach specyfikacji, uznawane są za równie dobre. Jednak takie podejście podważone zostało przez Genichi Taguchi'ego (Taguchi *et al.*, 1989, s.12-24), który sformułował koncepcję tzw. funkcji strat, dowodząc, że każde odchylenie funkcjonalnej charakterystyki wyrobu od celu wiąże się z pewną stratą (tzw. straty jakości) – tym większą, im większe jest odchylenie – a gdy odchylenie to przekroczy pewną wartość (określaną tu jako Δ), straty jakości równają się kosztom złomowania lub wytworzenia wyrobu (Rysunek 1.4).



Rys.1.4. Funkcja strat według Taguchi'ego: związek pomiędzy stratami jakości, a odchyleniem od wartości docelowej (m)

Źródło: na podstawie Taguchi *et al.*, 1989, s.14

Uwzględnienie koncepcji funkcji strat Taguchi'ego, powoduje, że nie wszystkie wyniki procesu mieszczące się w granicach specyfikacji, mogą być uznane za jednakowo „dobre”. W związku z tym, kolejne działania mające na celu doskonalenie procesu, a tym samym minimalizację strat (zarówno dla klienta, jak i dla producenta), polegają na dążeniu do zmniejszenia zmienności procesu (Rysunek 1.5: a i b).



Rys.1.5. Porównanie Głosu Procesu z Głosem Klienta, z uwzględnieniem funkcji strat oraz zmienności procesu:
a) przed poprawą
b) po poprawie

Źródło: opracowanie na podstawie Scherkenbach, 1991, s.78-79

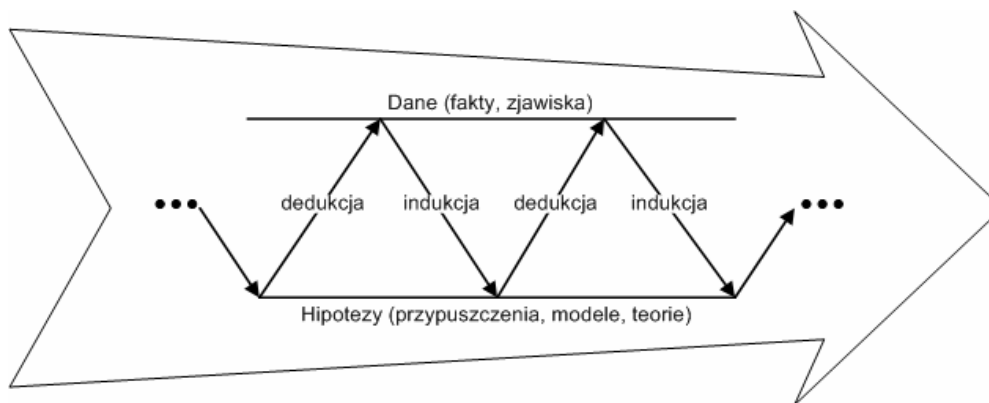
Działania zmierzające do redukcji zmienności procesu, choć niewątpliwie trudniejsze od przesunięcia procesu w kierunku środka pola tolerancji (Deming, 1994, s.354), uznawane są zatem za jedno z najważniejszych działań w doskonaleniu procesów.

1.2. Uzasadnienie podjęcia tematu

1.2.1 Budowanie wiedzy procesowej

Jednym z kluczowych elementów niezbędnych do efektywnego zarządzania procesem, a w szczególności do skutecznego prowadzenia działań mających na celu doskonalenie procesu poprzez redukcję jego zmienności, jest głęboka znajomość danego procesu (Britz *et al.*, 2000, s.98; Dooley *et al.*, 2000, s.219; Steiner i MacKay, 2005, s.1; Steiner *et al.*, 2008). Wiedza procesowa uważana jest za jeden z najważniejszych zasobów, na bazie których przedsiębiorstwo może budować swoją przewagę konkurencyjną. Ma ona zatem znaczenie strategiczne, którego nie sposób przecenić (Dooley *et al.*, 2000, s.207).

Proces zdobywania wiedzy procesowej można opisać przy pomocy modelu iteracyjnego zdobywania wiedzy (Rysunek 1.6). Zgodnie z tym modelem, wiedza budowana jest dzięki ciągłemu przetwarzaniu informacji pochodzących z dwóch obszarów: obszaru „hipotez”, opierającego się na teoretycznych założeniach, oraz obszaru „danych”, będących rezultatem badania rzeczywistych zjawisk. W cyklu zdobywania wiedzy, hipotezy stawiane w oparciu o posiadane informacje, są następnie weryfikowane dzięki przeprowadzaniu badań w oparciu o zebrane dane opisujące analizowane zjawisko. Każdy kolejny cykl wzbogaca zasób wiedzy, stając się jednocześnie podstawą do modyfikacji wysuniętej hipotezy lub formułowania kolejnych hipotez. Następujące po sobie procesy stawiania hipotezy i jej doświadczalnej weryfikacji stają się w ten sposób motorem napędzającym proces zdobywania wiedzy, która wzbogaca atuty przedsiębiorstwa i wspomaga doskonalenie, zwiększając skuteczność podejmowanych działań.



Rys.1.6. Iteracyjny proces zdobywania wiedzy

Źródło: na podstawie Box *et al.*, 1978, s.2

W przypadku procesów produkcyjnych, powyższy model zdobywania wiedzy może zostać wykorzystany w procesie doskonalenia, łącząc dwa podejścia do doskonalenia procesów produkcyjnych, które stosowane są najczęściej niezależnie – podejście związane z technologią procesów oraz podejście wywodzące się z tematyki Zarządzania Jakością.

1.2.2. Doskonalenie procesów w podejściu związanym z teorią technologii procesów

Odpowiednia wiedza technologiczna, służąca do projektowania i zarządzania procesami produkcyjnymi, zapewnia szereg informacji, które są wykorzystywane do doskonalenia tych procesów na wszystkich etapach związanych zarówno z ich planowaniem jak i funkcjonowaniem. Jednak mimo to, często zdarza się, że w przypadku gdy w procesie zaistnieje problem z zapewnieniem odpowiedniego poziomu jakości, tzn. zmienność procesu przekroczy granice specyfikacji, znalezienie i usunięcie przyczyny takiego stanu rzeczy nie jest zadaniem łatwym. Wynika to przede wszystkim z faktu, że odpowiednia wiedza technologiczna jest bardzo rozległa. Opiera się ona na znajomości teoretycznych oraz zaobserwowanych zależności zachodzących pomiędzy zmiennymi w procesie – w szczególności w odniesieniu do potencjalnych przyczyn, jakie mogą wpływać na zmienność analizowanej charakterystyki wyjściowej badanego procesu. Dlatego, pomimo że literatura fachowa zawiera wiele cennych informacji, ich ilość, a także często duże rozproszenie, powodują że zdobycie odpowiedniego poziomu wiedzy technologicznej, umożliwiającego sprawne zarządzanie zmiennością procesów produkcyjnych, nie jest łatwe. Z reguły, osiągnięcie takiego poziomu wymaga wiele nauki, podbudowanej wieloma latami praktycznego doświadczenia. Znaczenie doświadczonego technologa, osoby posiadającej szeroką wiedzę i dobrze znającej dany proces, jako jednego z kluczowych elementów w doskonaleniu procesów w przedsiębiorstwie, jest niejednokrotnie podkreślane w literaturze technologicznej (np. Feld, 2000, s.25; Choroszy, 2000, s.10, s.62; Szatkowski, 2008, s.102). Jednakże w dzisiejszych czasach, w warunkach dynamicznie rozwijającego się rynku i rosnącej konkurencji, a także wobec coraz szybszego rozwoju nowych technologii, coraz trudniej o takie – niezwykle cenne dla przedsiębiorstwa – osoby. Ponadto, powierzenie tak wartościowego elementu, jakim jest wiedza procesowa, jednej osobie jest nierozważne z punktu widzenia przedsiębiorstwa, bowiem powinno ono dążyć do budowania trwałego, otwartego zasobu wiedzy, który w razie potrzeby będzie dostępny dla wszystkich członków organizacji.

1.2.3. Doskonalenie procesów w podejściu związanym z Zarządzaniem Jakością

Z drugiej strony, w sytuacji gdy proces produkcyjny wykazuje zbyt dużą zmienność, wykorzystywane są także niejednokrotnie sposoby postępowania wywodzące się z obszaru Zarządzania Jakością. Istnieje i wciąż powstaje wiele strategii i podejść (jak choćby TQM czy Six Sigma), służących do doskonalenia procesów. W ramach tych podejść stosuje się odpowiednie metody, techniki i narzędzia, które umożliwiają analizę procesu (na bazie zebranych danych) w celu identyfikacji i wyeliminowania przyczyny (lub przyczyn) problemu.

Każde z tych podejść ma swoich zwolenników – przede wszystkim należą do nich przedsiębiorstwa, które dzięki nim doskonałą swoje procesy. Na przykład, przeanalizowanie listy laureatów amerykańskiej nagrody jakości imienia Malcolma Baldrige'a* (ang. *Malcolm Baldrige Award*) – prestiżowej nagrody, przyznawanej corocznie od roku 1987 w Stanach Zjednoczonych, przedsiębiorstwom prezentującym wysokiej klasy osiągnięcia w obszarze jakości – pozwala zauważyć, że wysoką jakość można osiągać wykorzystując różne podejścia. Wśród laureatów *Malcolm Baldrige Award* zastosowanie znalazły zarówno powszechnie znane podejścia i strategie, takie jak TQM, Six Sigma, Lean Six Sigma, czy budowanie Systemu Zarządzania Jakością zgodnego z normami ISO serii 9000, jak i cały szereg „skrojonych na miarę” systemów doskonalenia, o nieznanym powszechnie nazwie, funkcjonujących wyłącznie w ramach danej organizacji.

Duża liczba możliwych strategii doskonalenia, a także szeroki wybór metod i narzędzi, zawartych w każdej z nich, stawia przedsiębiorstwa pragnące podjąć działania w celu doskonalenia procesów, przed koniecznością dokonania trudnego wyboru. W praktyce, nazbyt często wybór taki podyktowany jest popularnością danej metody, a nie jej spodziewaną skutecznością w odniesieniu do potrzeb danego przedsiębiorstwa. Wybór strategii doskonalenia powinien być dokonany świadomie, a jednym z głównych kryteriów, branych w takim wypadku pod uwagę, powinien być rodzaj problemu, jaki ma zostać rozwiązany przy użyciu wybieranej strategii, ponieważ nie każdy sposób postępowania jest odpowiedni w każdej sytuacji (Smith, 2000; Harvey, 2004, s.41).

Problem wyboru odpowiedniego podejścia do doskonalenia procesu jest dostrzegany przez praktyków, często posiadających wieloletnie doświadczenie w stosowaniu różnych strategii doskonalenia procesów. Wielu z nich zauważa, że ciągle rosnąca liczba podejść do doskonalenia jakości procesów powoduje, że wybór odpowiedniego podejścia staje się trudny (Adams *et al.*, 1997, s.21; Harvey, 2004, s.41; Thawesaengskulthai i Tannock, 2008, s.367), szczególnie dla osób nie dysponujących głęboką wiedzą w obszarze Zarządzania Jakością.

Ponadto, każde z podejść do doskonalenia procesów opiera się na wykorzystaniu szerokiej gamy metod, technik i narzędzi doskonalenia, służących do analizy i redukcji zmienności procesów. Z reguły są one przedstawiane jako pewien zbiór, przeznaczony do zastosowania na kolejnych etapach prowadzonych działań doskonalących. Uważa się, że wiele ze strategii doskonalenia procesów funkcjonuje na zbyt ogólnym poziomie i proponując wiele metod, technik i narzędzi, nie dość dokładnie precyzuje, w jakiej konfiguracji powinny być one zastosowane i w jaki sposób połączone ze sobą, dla uzyskania jak najlepszego efektu (Snee i Hoerl, 2003, s.208; Sutton, 2006, s.46). Dlatego, po wybraniu danej strategii doskonalenia, jeszcze więcej trudności może następczą poruszać się na poziomie poszczególnych metod i narzędzi, stosowanych w obrębie każdego z ogólnych podejść do doskonalenia jakości procesów. Również na tym, niższym poziomie, przy wyborze narzędzia

* Informacje na temat laureatów nagrody imienia Malcolma Baldrige'a dostępne są na stronie internetowej, pod adresem: http://www.baldrige.nist.gov/Award_Recipients.htm

należy mieć na uwadze problem, jaki za jego pomocą ma zostać rozwiązany, albowiem nie każde narzędzie jest odpowiednie dla każdego problemu (Okes, 2002, s.25; Harvey, 2004, s.41; Sutton, 2006, s.48). W praktyce jednak, taki w pełni świadomy wybór wymagałby znajomości i zrozumienia jak najszerszej gamy metod, technik i narzędzi doskonalenia, na poziomie umożliwiającym identyfikację warunków ich skutecznego zastosowania. Osiągnięcie takiego poziomu wiedzy wymaga, podobnie jak w przypadku podejścia związanego z teorią technologii procesów, długiej nauki i bogatego doświadczenia.

W związku z tym, duży nacisk kładzie się na właściwy, uwzględniający odpowiednie kryteria, wybór działań mających na celu doskonalenie procesu, zarówno na poziomie strategii, jak i na poziomie poszczególnych metod, technik i narzędzi doskonalenia jakości wykorzystywanych w ramach wybranego podejścia. Kierowanie się aktualną popularnością danej strategii doskonalenia procesów, często prowadzi do wdrażania coraz to nowych, aktualnie „modnych” podejść, co może prowadzić do negatywnych skutków. W takiej sytuacji bowiem pracownicy przedsiębiorstwa mogą czuć się coraz bardziej zdezorientowani i coraz mniej przekonani o skuteczności kolejnego wdrażanego podejścia. Ponadto, nieumiejętny dobór metod, technik i narzędzi w ramach wybranej strategii, czy też próby stosowania jednego sprawdzonego narzędzia do rozwiązania wszystkich problemów – co często ma miejsce w praktyce – mogą skutkować niedopasowaniem podejścia czy narzędzia do danego problemu. Skutkiem takiej sytuacji może być nie tylko nie rozwiązanie problemu, prowadzące do porażki realizowanego działania doskonalącego, ale także wywołanie dezorientacji i zniechęcenia pracowników, co może niekorzystnie odbić się na całej organizacji (Adams *et al.*, 1997, s.21; Okes, 2002, s.26).

W literaturze z zakresu Zarządzania Jakością podkreśla się konieczność odpowiedniego doboru metody doskonalenia jakości, oraz przedstawia pewne ogólne wskazówki dotyczące takiego wyboru, zarówno na poziomie strategii, jak i na poziomie poszczególnych metod i narzędzi. Na przykład Thawesaengskulthai (2007; Thawesaengskulthai *et al.*, 2008) proponuje kryteria doboru ogólnej strategii doskonalenia jakości w przedsiębiorstwie (na wysokim poziomie ogólności) z punktu widzenia korzyści, jakie może ona przynieść. Natomiast na poziomie poszczególnych metod i narzędzi – gdzie wybór jest bardzo duży – oprócz pojedynczych wskazówek dotyczących różnych grup metod i narzędzi, kładzie się nacisk na odpowiedni poziom wiedzy, konieczny do dokonania właściwego wyboru. Niestety, w rzeczywistości większość praktyków, inżynierów zajmujących się w przedsiębiorstwach procesami produkcyjnymi, nie dysponuje tak głęboką i sprawdzoną w praktyce wiedzą z zakresu metod i technik Zarządzania Jakością. Problem ten został dostrzeżony m.in. przez Starzyńską *et al.* (2009), którzy w jednej z najnowszych publikacji proponują metodę wspomagającą dokonanie wyboru narzędzia jakości odpowiadającego wymaganiom użytkownika. Metoda ta – mająca zastosowanie dla grupy wybranych narzędzi jakości – ma stać się elementem opracowywanej przez autorów szerszej metodyki. Jednakże, na chwilę obecną, nie znaleziono w literaturze spójnego i szczegółowego, schodzącego do poziomu poszczególnych metod, technik i narzędzi, algorytmu wskazującego jak taki dobór powinien przebiegać na kolejnych etapach procesu doskonalenia.

1.3. Zidentyfikowana luka poznawcza

Doskonalenie procesów produkcyjnych realizowane jest zatem poprzez wykorzystanie podejścia związanego z teorią technologii procesów lub też podejścia związanego z Zarządzaniem Jakością. Stosowane są one z reguły niezależnie od siebie. Zauważana jest jednak potrzeba ich połączenia. Szczególnie w literaturze z zakresu Zarządzania Jakością

niektórzy autorzy zwracają uwagę na fakt, że w działaniach mających na celu redukcję zmienności procesów powinni brać udział „eksperci techniczni”, a narzędzia doskonalenia powinny być połączone z odpowiednią wiedzą przedmiotową (Nolan i Provost, 1990, s.77; Snee i Hoerl, 2003, s.209). Wskazuje się, że istotna jest nie tylko umiejętność zastosowania odpowiedniego narzędzia, ale także umiejętność zinterpretowania uzyskanych wyników (Parsons, 1992, s.34; Snee, 2003, s.88), przekładając rozwiązanie z „języka narzędzia” na „język procesu” – do czego potrzebna jest odpowiednia wiedza procesowa. Także w literaturze związanej z teorią technologii procesów dostrzega się potrzebę połączenia tych dwóch podejść. Proponuje się na przykład integrację zaawansowanych narzędzi statystycznych (wchodzących w zakres narzędzi stosowanych w Zarządzaniu Jakością) z wiedzą typowo inżynierską dotyczącą danego analizowanego procesu, aby skutecznie identyfikować obszary, w których zlokalizowane są przyczyny błędów pojawiających się w procesie (Ceglarek i Shi, 1996, s.55). Taka idea zgodna jest z zaproponowaną przez Doriana Shainina koncepcją Inżynierii Statystycznej (ang. *Statistical Engineering*), u podstaw której leży założenie, że do identyfikacji przyczyn zmienności w procesie potrzebne jest połączenie procesowej wiedzy inżynierskiej z wiedzą empiryczną, uzyskaną dzięki badaniu procesu za pomocą metod statystycznych (Steiner *et al.*, 2008). Korzyścią wynikającą z połączenia wiedzy inżynierskiej z badaniem procesu jest przede wszystkim budowanie wiedzy procesowej, która umożliwi doskonalenie. Takie połączenie uważane jest za niezbędne do właściwej identyfikacji przyczyn zmienności procesu (Sanders *et al.*, 2000, s.557). Empiryczne poznawanie procesu możliwe jest przede wszystkim dzięki jego obserwacji oraz prowadzeniu badań i eksperymentów – a w tym celu zastosowanie znajdują metody i narzędzia pochodzące z obszaru Zarządzania Jakością. Połączenie takiego sposobu pozyskiwania informacji o procesie z wiedzą i teorią inżynierską, pozwala budować wiedzę procesową (Steiner i MacKay, 2005, s.1), zgodnie z modelem iteracyjnego zdobywania wiedzy (Rys. 1.6).

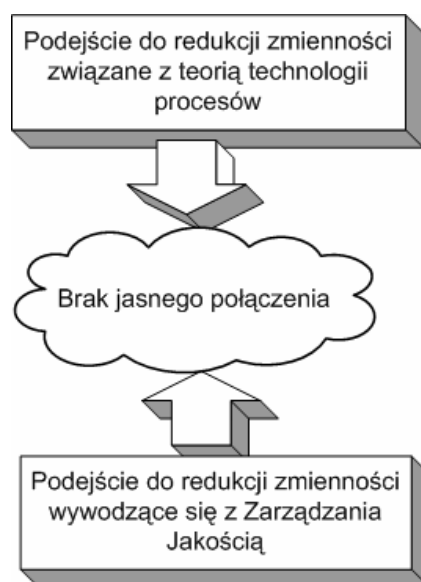
W literaturze podkreśla się, że te dwa podejścia wzajemnie się wspierają – teorie zbudowane w oparciu o wiedzę przedmiotową wymagają zastosowania odpowiednich metod i narzędzi w celu ich weryfikacji, a informacje uzyskane dzięki analizom przeprowadzonym za pomocą odpowiednich metod i narzędzi pomagają udoskonalać, rozszerzać lub korygować stawiane hipotezy. Powtarzanie takiej sekwencji skutkuje budowaniem coraz większej wiedzy procesowej (Snee i Hoerl, 2003, s.209). Ponadto, zwraca się uwagę na fakt, że stosowanie każdego z tych dwóch podejść oddzielnie – badania procesu za pomocą różnych metod i narzędzi bez wykorzystania wiedzy przedmiotowej, lub wiedzy przedmiotowej bez badania procesu – jest niekorzystne i zmniejsza skuteczność prowadzonych działań. Mimo to, często spotyka się sytuację, w której prowadzone działania doskonalące oparte są na przekonaniu, że wszystkie problemy mogą zostać rozwiązane na bazie fundamentalnych praw inżynierii czy fizyki, i nie wymagają jakiegokolwiek zbierania danych i analizy. Z drugiej strony, samo wykorzystanie metod i narzędzi analizy danych nie może zastąpić odpowiedniej wiedzy przedmiotowej, niezbędnej do formułowania teorii oraz odpowiedniej interpretacji wyników badań. Należy łączyć oba podejścia, odpowiednio integrując wiedzę przedmiotową z analizą danych (Snee i Hoerl, 2003, s.210).

Niestety, w praktyce te dwa podejścia do doskonalenia procesów produkcyjnych – opieranie się na wiedzy technologicznej oraz zastosowanie metod i narzędzi służących do badania i analizy procesów – stosowane są przeważnie niezależnie od siebie, bez odpowiedniej integracji. Problem ten dostrzegany jest w literaturze. Zauważa się na przykład, że często brakuje odpowiedniej komunikacji pomiędzy inżynierami, menadżerami i statystykami akademickimi w świecie przemysłowym, do celów rozwiązywania problemów

jakościowych, co powoduje, że możliwości doskonalenia procesów są ograniczone (Antony *et al.*, 1998, s.170).

Zauważono także, że pomimo podkreślania konieczności połączenia tych dwóch podejść, nie wskazuje się w literaturze szczegółowego sposobu dokonania takiego połączenia, który mógłby zostać wykorzystany w praktyce. Nie znaleziono w literaturze propozycji integracji podejścia związanego z technologią procesów z podejściem wywodzącym się z Zarządzania Jakością, w formie jednego spójnego i szczegółowego sposobu postępowania, który wskazywałby odpowiednie metody, techniki i narzędzia, jakie należałoby zastosować, aby skutecznie zredukować zmienność analizowanego procesu.

Biorąc pod uwagę przedstawiony wyżej stan wiedzy, zidentyfikowano lukę istniejącą pomiędzy dwoma podejściami do doskonalenia procesów produkcyjnych poprzez redukcję ich zmienności: podejściem wywodzącym się z teorii technologii procesów oraz podejściem związanym z Zarządzaniem Jakością (Rysunek 1.7).



Rys.1.7. Zidentyfikowana luka poznawcza

Źródło: opracowanie własne

Na podstawie przeprowadzonej analizy literatury z zakresu technologii procesów produkcyjnych oraz z zakresu Zarządzania Jakością stwierdzono, że połączenie tych dwóch podejść pozwoliłoby na znaczne zwiększenie skuteczności działań mających na celu doskonalenie procesów produkcyjnych poprzez redukcję ich zmienności. Połączenie takie umożliwiłoby budowanie wiedzy procesowej, dzięki wykorzystaniu procesu iteracyjnego zdobywania wiedzy, w ramach którego wiedza z obszaru teorii technologii procesów produkcyjnych służyłaby do formułowania hipotez, natomiast metody, techniki i narzędzia z obszaru Zarządzania Jakością umożliwiłyby analizę danych pozyskanych z procesu w celu weryfikacji tych hipotez. W ten sposób budowana wiedza procesowa umożliwiłaby doskonalenie badanych procesów, poprzez redukcję ich zmienności.

Z uwagi na obszerność tematyki związanej z procesami produkcyjnymi, w dalszych rozważaniach skupiono się na procesach produkcyjnych realizowanych za pomocą technologii obróbki skrawaniem, jako szeroko stosowanym i rozwijanym sposobie wytwarzania wyrobów.

1.4. Teza, cel i zakres pracy

W oparciu o przeprowadzoną analizę literatury, a także mając na uwadze zidentyfikowaną lukę poznawczą, sformułowano **tezę pracy**:

Możliwe jest połączenie wiedzy technologicznej ze sposobem postępowania, a także metodami i narzędziami wywodzącymi się z obszaru Zarządzania Jakością, w spójną metodykę, której zastosowanie pozwoli skutecznie doskonalić procesy obróbki skrawaniem, poprzez redukcję ich zmienności odzwierciedlającej się w zmienności właściwości jakościowych wytwarzanych wyrobów, jednocześnie wspierając budowanie wiedzy procesowej w przedsiębiorstwie.

Za **cel pracy** postawiono wypełnienie zidentyfikowanej luki poznawczej, poprzez opracowanie *Metodyki redukcji zmienności procesów obróbki skrawaniem*[†], łączącej dwa podejścia do doskonalenia procesów: podejście związane z teorią technologii procesów oraz podejście wywodzące się z Zarządzania Jakością. Odpowiadająca na zaobserwowane zapotrzebowanie, opracowana metodyka powinna określać jednoznaczny sposób postępowania, poprzez wskazanie kolejnych kroków, jakie należy podjąć, a także odpowiednich metod, technik i narzędzi doskonalenia, których wykorzystanie umożliwi redukcję zmienności procesów obróbki skrawaniem.

Zakres pracy ograniczono zgodnie z przyjętymi założeniami:

- Przez **zmienność procesów produkcyjnych** w pracy rozumie się niezamierzoną zmienność znajdującą odzwierciedlenie w wynikach działania danego procesu poprzez zmienność właściwości jakościowych wytwarzanych w tym procesie wyrobów. Redukcja tak rozumianej zmienności, jako podstawowy element doskonalenia procesu, przeprowadzana jest w celu uzyskania wymaganej powtarzalności produkowanych wyrobów, która jest jedną z miar jakości procesu.
- Do badań na potrzeby opracowania metodyki wybrano **procesy produkcyjne** realizowane za pomocą technologii **obróbki skrawaniem**. W tym względzie, obszar pracy określono szczegółowo w Rozdziale 2.1.
- Skupiono się na **redukcji zmienności** naturalnej procesów (wynikającej z tzw. przyczyn losowych), jako głównym sposobie doskonalenia jakości procesów. Szczegółowe uzasadnienie takiego wyboru zawarto w Rozdziale 3.1.
- Zakres prac ograniczono do **doskonalenia istniejących procesów** produkcyjnych.

Aby zrealizować postawiony cel pracy, przeprowadzono następujące działania:

1. Analiza podejścia do problemu zmienności w procesach obróbki skrawaniem.
2. Analiza pojęcia zmienności procesu, a także jej rodzajów i związanych z nimi sposobów postępowania.
3. Przegląd, porównanie i analiza sposobów redukcji zmienności, wywodzących się z obszaru Zarządzania Jakością.
4. Analiza kryteriów zastosowania metod, technik i narzędzi doskonalenia procesów pochodzących z obszaru Zarządzania Jakością, a także identyfikacja najczęściej stosowanych i zalecanych metod i technik oraz ich wspólna klasyfikacja.

[†] Stosowane w niniejszej pracy określenie „*Metodyka redukcji zmienności procesów obróbki skrawaniem*” odnosi się do *zmienności procesów* wywołującej zmienność właściwości jakościowych wytwarzanych wyrobów.

5. Opracowanie *Metodyki redukcji zmienności procesów obróbki skrawaniem*:
 - 5a. Zdefiniowanie poszczególnych etapów postępowania.
 - 5b. Określenie szczegółowego algorytmu postępowania, wskazującego odpowiednie metody i narzędzia, jakie powinny zostać zastosowane w ramach poszczególnych kroków metodyki.
 - 5c. Identyfikacja, zgromadzenie i uporządkowanie odpowiedniej wiedzy z zakresu technologii procesów obróbki skrawaniem, oraz jej przystosowanie na potrzeby opracowywanej metodyki.
 - 5d. Połączenie wiedzy technologicznej z odpowiednimi krokami postępowania w ramach opracowywanej metodyki.
6. Porównanie opracowanej metodyki z przebiegiem rzeczywistych projektów doskonalących zrealizowanych przy wykorzystaniu innego sposobu doskonalenia procesów.
7. Weryfikacja skuteczności opracowanej metodyki w warunkach rzeczywistego procesu produkcyjnego.

Rezultaty przeprowadzonych działań przedstawiono w dalszej części niniejszej pracy:

W **Rozdziale 2.** zdefiniowano obszar pracy, który ograniczono do procesów obróbki skrawaniem, a także przeanalizowano podejście do redukcji zmienności procesów produkcyjnych związane z teorią technologii procesów. Zidentyfikowano i opisano różne podejścia do redukcji zmienności w procesach obróbki skrawaniem.

Rozdział 3. poświęcono podejściu do redukcji zmienności procesów wywodzącemu się z obszaru Zarządzania Jakością. Przedstawiono pojęcie zmienności procesu oraz jej rodzaje. Omówiono różne podejścia do redukcji zmienności. Dokonano przeglądu i porównania zidentyfikowanych sposobów doskonalenia procesów, a także zidentyfikowano zbiór najczęściej stosowanych i zalecanych metod, technik i narzędzi doskonalenia, które poddano wspólnej klasyfikacji.

W **Rozdziale 4.** zaprezentowano opracowaną *Metodykę redukcji zmienności procesów obróbki skrawaniem*. Przedstawiono założenia, będące podstawą jej opracowania, a następnie szczegółowo omówiono każdy z jej etapów. Zaprezentowano opracowane *Zestawienie potencjalnych przyczyn błędów obróbki skrawaniem*, któremu nadano formę tabeli (Załącznik A do niniejszej pracy), a także zaproponowanego systemu ekspertowego (Załącznik B).

Rozdział 5. przedstawia porównanie opracowanej *Metodyki redukcji zmienności procesów obróbki skrawaniem* z przebiegiem dwóch rzeczywistych projektów doskonalących przeprowadzonych zgodnie z innym sposobem postępowania.

W **Rozdziale 6.** zaprezentowano weryfikację opracowanej metodyki, którą przeprowadzono w warunkach rzeczywistego procesu produkcyjnego.

Rozdział 7. zawiera podsumowanie pracy, w którym przedstawiono główne wnioski wynikające z przeprowadzonych działań oraz propozycje kierunków dalszych prac.

2. PROBLEM ZMIENNOŚCI W PROCESACH OBRÓBKII SKRAWANIEM

2.1. Obszar pracy – obróbka skrawaniem

Procesy produkcyjne to zagadnienie bardzo ogólne i szerokie. Zaliczają się do nich zarówno różnego rodzaju procesy technologiczne, jak i wiele procesów pomocniczych, takich jak procesy przygotowawcze, pomiarowo-kontrolne, transportowe, itp. Aby zatem zrealizować cel pracy, ograniczono jej zakres, skupiając badania na procesach obróbki skrawaniem, które stanowią jeden z rodzajów kształtowania ubytkowego wyrobów (Rys. 2.1).

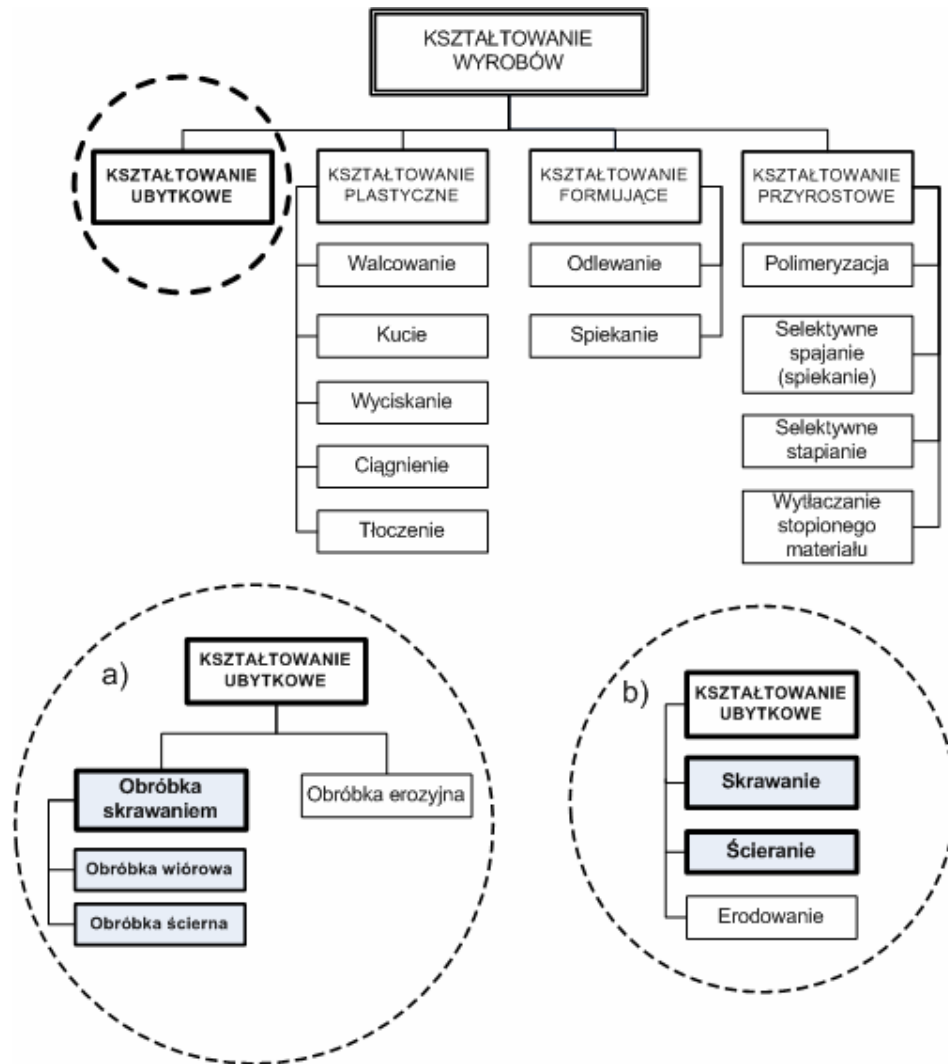
Zgodnie z klasycznymi definicjami, obróbka skrawaniem:

- „polega na usuwaniu za pomocą pracy mechanicznej, określonej objętości materiału (naddatku na obróbkę) narzędziami zaopatrzonymi w klinowe ostrza skrawające, twardsze od obrabianego materiału” (Kaczmarek, 1970, s. 26);
- to „proces technologiczny, polegający na nadawaniu przedmiotom wymaganych kształtów, wymiarów oraz jakości powierzchni przez usunięcie nadmiaru materiału, w postaci wiórów” (Okoniewski, 1976, s.203);
- „jest częścią procesu wytwarzania elementów urządzeń technicznych, w której przedmiot obrabiany uzyskuje wymagane kształty, wymiary i jakość powierzchni przez usuwanie ostrzem narzędzia warstw naddatku materiału zamienianego na wióry” (Górski, 1991, s.1)

Zgodnie z klasycznym podejściem (Kaczmarek, 1970; Okoniewski, 1976; Górski, 1991; Grzesik, 1998; Żebrowski, 2004), obróbka skrawaniem obejmuje:

- obróbkę wiórową – polegającą na skrawaniu przy pomocy narzędzi o określonej liczbie i kształcie ostrzy skrawających, przy czym naddatek na obróbkę jest usuwany w postaci wiórów widocznych gołym okiem,
- obróbkę ścierną – polegającą na skrawaniu za pomocą narzędzi o licznych drobnych ostrzach (ziaren materiału ściernego), o nieustalanej ściśle liczbie i kształcie, przy czym naddatek na obróbkę jest usuwany w postaci drobnych wiórów, które na ogół nie są widoczne gołym okiem (Kaczmarek, 1970, s.27; Górski, 1991, s.1).

Klasyfikacja podstawowych rodzajów kształtowania wyrobów przedstawiona na Rysunku 2.1 pokazuje klasyczny podział obróbki skrawaniem (Rysunek 2.1.a), a także podział zaproponowany przez Oczosia (Rysunek 2.1.b). Oczos (2005a) postuluje uporządkowanie nazewnictwa i odejście od klasycznego podziału obróbki skrawaniem na obróbkę wiórową i ścierną. Zauważa on, że dotychczas stosowane, „tradycyjne” rozróżnienie jest niekonsekwentne, bowiem wiór powstaje zarówno podczas obróbki wiórowej, jak i ściernej i jednocześnie proponuje rozdzielenie tych dwóch rodzajów kształtowania ubytkowego i traktowanie ich jako równorzędnych. Ponieważ jednak propozycja ta jest stosunkowo nowa, a klasyczne podejście mocno ugruntowane, dlatego w tej pracy obróbka skrawaniem będzie traktowana szeroko i – zgodnie z tradycyjnym ujęciem – zaliczane będą do niej zarówno procesy obróbki wiórowej, jak i obróbki ściernej.



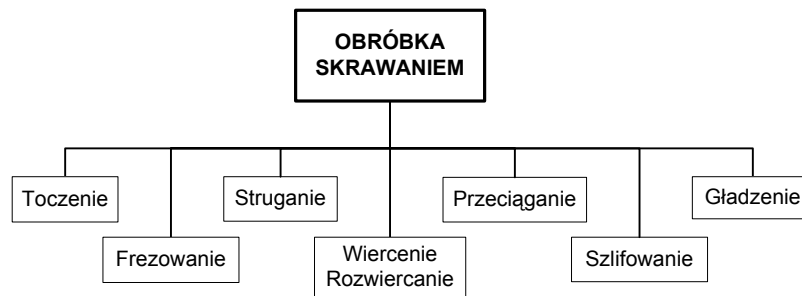
Rys.2.1. Klasyfikacja podstawowych rodzajów kształtowania wyrobów i tworzących je grup sposobów wytwarzania (z pominięciem technologii łączących), uwzględniająca kształtowanie ubytkowe:

- a) w ujęciu klasycznym (Kaczmarek, 1970, s.25),
- b) w ujęciu proponowanym przez Oczosia (2005a),
z wyróżnieniem wybranego obszaru badań

Źródło: na podstawie: Oczos, 2005a; Kaczmarek, 1970, s.25

Ze względu na stosowane narzędzia, kinematykę obróbki, a także osiąganą dokładność wymiarowo-kształtową, skrawanie można podzielić na: sposoby (np. toczenie, frezowanie, itp.), odmiany (np. toczenie wzdłużne, czołowe, stożkowe, itp.) i rodzaje (np. obróbka zgrubna, średniodokładna, dokładna i bardzo dokładna; lub: wstępna, kształtująca i wykańczająca) (Grzesik, 1998, s.21-22).

W zakres obróbki skrawaniem wchodzi różne sposoby obróbki, z których główne zostały przedstawione na Rysunku 2.2.



Rys.2.2. Główne sposoby obróbki skrawaniem

Źródło: na podstawie: Kaczmarek, 1970; Okoniewski, 1976; Górski, 1991; Karpiński, 2007

Obróbka skrawaniem jest dziedziną, która dynamicznie się rozwija. Obok tradycyjnych obrabiarek i metod obróbki, w odpowiedzi na coraz wyższe wymagania stawiane przez klienta, związane między innymi z krótkim czasem i wysoką dokładnością obróbki, a także wymagania ekologiczne, pojawiają się nowe trendy w obróbce skrawaniem. Jednym z takich trendów jest konstruowanie obrabiarek wielozadaniowych (tzw. centrów obróbkowych) umożliwiających obróbkę przedmiotu w jednym zamocowaniu, realizowaną przez integrację kilku różnych sposobów wytwarzania w jednej maszynie. Dąży się do przeprowadzania całego procesu obróbki w jednym zamocowaniu, z ograniczoną obsługą lub w pełni bezobsługowo (Oczoś, 2006). Systemy sterowania, stosowane w obrabiarkach sterowanych numerycznie, są coraz sprawniejsze, a jednocześnie umożliwiają wprowadzenie dodatkowych układów nadzorowania i diagnozowania pracy obrabiarki (Oczoś, 2004b). Ponadto, do stosunkowo nowych i wciąż rozwijających się obszarów w obróbce skrawaniem zaliczyć można takie zagadnienia, jak: obróbka precyzyjna i mikroobróbka (kształtowanie materiałów w zakresie 1 μm i poniżej), obróbka na sucho i obróbka z minimalnym smarowaniem i chłodzeniem, obróbka na twardo, obróbka z dużymi prędkościami skrawania (ang. *High Speed Cutting*, HSC), obróbka wysokowydajna (ang. *High Performance Cutting*, HPC) (Oczoś, 2002, 2004a, 2004b, 2004c, 2005b; Byrne *et al.*, 2003). Trendy te, jak również obróbka wielu nowych materiałów, pociągają za sobą poszukiwania nowych rozwiązań, również w zakresie oprzyrządowania i narzędzi skrawających. Rozwój w obszarze narzędzi skrawających obejmuje między innymi zastosowanie nowych materiałów, modyfikacje geometrii, powierzchni, a także zastosowanie wewnętrznego smarowania i chłodzenia (Oczoś, 2004a).

Jako dziedzina rozwijająca się, w której wymagania dotyczące dokładności wciąż rosną, a warunki ulegają zmianom, obróbka skrawaniem potrzebuje metod pozwalających doskonalić jakość realizowanych procesów.

2.2. Zmienność w procesach obróbki skrawaniem – błędy obróbki

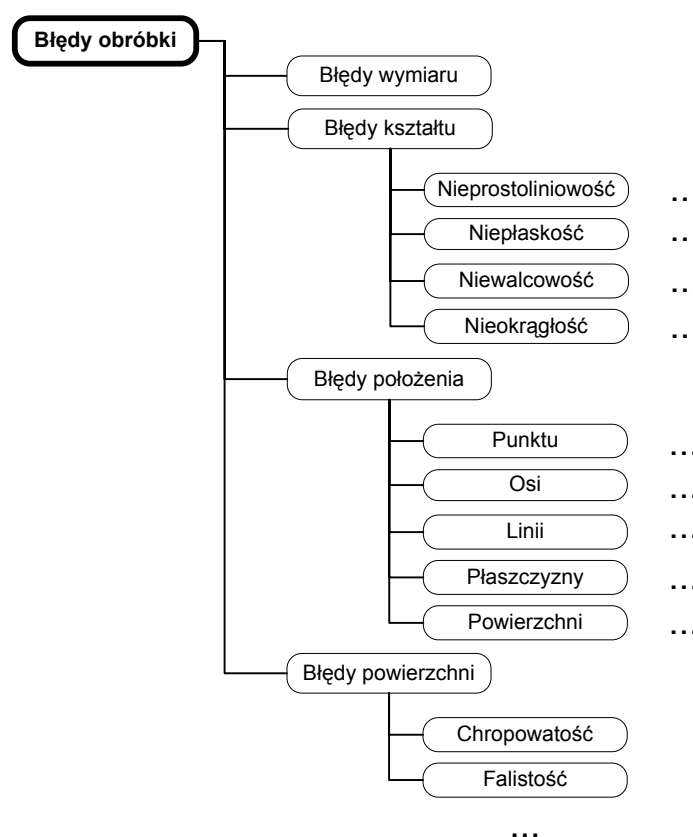
Do podstawowych celów obróbki dla dowolnego rodzaju procesu technologicznego w wytwarzaniu maszyn zaliczane są (Kolman *et al.*, 1969, s.11):

- Otrzymanie potrzebnego kształtu;
- Uzyskanie odpowiedniej dokładności wymiarów;
- Osiągnięcie właściwej jakości powierzchni.

Wielkości tych charakterystyk – tak jak wynik każdego procesu – podlegają zmienności, a ich utrzymanie w określonych granicach specyfikacji warunkuje jakość

produkowanego wyrobu. Miarą tej jakości, w procesach obróbki skrawaniem, jest wielkość powstających niedokładności, które definiowane są jako „różnica występująca między przedmiotem rzeczywistym a idealnym, wynikająca z warunków wykonania” (Choroszy, 2000, s.47). Zatem każdy wykonany przedmiot cechować będzie pewna niedokładność, której miarą będzie różnica pomiędzy wymiarami i właściwościami zadanymi (nominalnymi), a stwierdzonymi na wykonanym przedmiocie (Kaczmarek, 1970, s.170). Niedokładności te nazywane są też błędami obróbki (także: kształtowania lub wytwarzania), a ich powstawanie, nieuniknione w rzeczywistych procesach, powoduje że osiągnane wyniki procesu cechuje pewna zmienność.

Błędy obróbki mogą przyjmować różne formy, zależne m.in. od specyficznej geometrii przedmiotu obrabianego i stosowanego sposobu obróbki. Zestawienie głównych błędów obróbki przedstawiono na Rysunku 2.3.



Rys.2.3. Zestawienie głównych błędów obróbki

Źródło: na podstawie: Kolman *et al.*, 1969; Andrzejewski *et al.*, 1993; Choroszy, 2000

Cztery główne rodzaje błędów kształtowania, jakimi są błędy wymiaru, kształtu, położenia oraz powierzchni, wynikają bezpośrednio z głównych aspektów pozwalających na weryfikację dokładności obróbki, które nazywane są przez Choroszego (2000, s.47) czterema kierunkami zgodności przedmiotu rzeczywistego i idealnego. Są to:

- dokładność wymiarów poszczególnych elementów przedmiotu,
- dokładność kształtu,
- dokładność wzajemnego położenia poszczególnych elementów przedmiotu,
- dokładność powierzchni.

Te cztery aspekty są ściśle związane z koncepcją specyfikacji geometrii wyrobów (ang. *Geometrical Product Specifications*, GPS), która obejmuje: tolerancje wymiarów, tolerancje geometryczne (w tym tolerancje kształtu, kierunku, położenia i bicia), tolerancje parametrów powierzchni (chropowatość, falistość). Spełnienie tych specyfikacji zapewnia uzyskanie wyrobów cechujących się wymaganym poziomem takich istotnych właściwości, jak: funkcjonalność, bezpieczeństwo, niezawodność oraz zamienność (Humienny, 2004, s.19-21).

2.3. Przyczyny błędów obróbki w procesach obróbki skrawaniem

Błędy kształtowania występujące w różnego rodzaju procesach obróbki skrawaniem wynikać mogą z wielu różnych przyczyn. W wielu źródłach literaturowych dotyczących tematyki obróbki skrawaniem przedstawiono potencjalne przyczyny błędów obróbki, w podziale na proponowane kategorie.

2.3.1. Przyczyny błędów obróbki skrawaniem wynikające z błędów obrabiarki

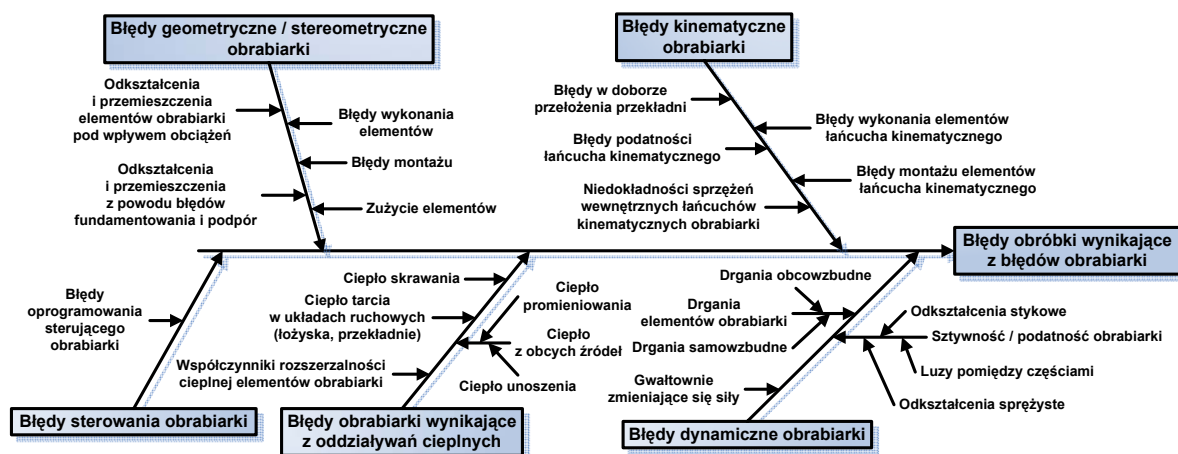
Część autorów rozważa błędy obróbki jedynie w odniesieniu do przyczyn wynikających z własności samej obrabiarki. W takim przypadku większość z przedstawianych klasyfikacji (Kaczmarek, 1970; Barakat *et al.*, 2000; Okafor i Ertekin, 2000; Schwenke *et al.*, 2008) obejmuje takie kategorie przyczyn błędów obróbki jak:

- błędy geometryczne (lub stereometryczne) obrabiarki, i/lub
- błędy kinematyczne obrabiarki.

Ponadto, autorzy (Kaczmarek, 1970; Okafor i Ertekin, 2000; Schwenke *et al.*, 2008) uwzględniają także inne kategorie błędów obrabiarek, takie jak:

- błędy dynamiczne / wywołane obciążeniami,
- błędy wynikające z oddziaływań cieplnych (nazywane też błędami termicznymi).

Oprócz tego, w odniesieniu do obrabiarek sterowanych numerycznie, Schwenke *et al.* (2008) wymieniają także grupę błędów obrabiarki, związanych ze sterowaniem i wynikających z błędów oprogramowania sterującego. Na Rysunku 2.4 zebrano, w formie diagramu przyczynowo-skutkowego (diagramu Ishikawy), wymieniane w literaturze przyczyny błędów obróbki, wynikające z błędów obrabiarki.



Rys.2.4. Zestawienie błędów obrabiarki powodujących powstawanie błędów obróbki

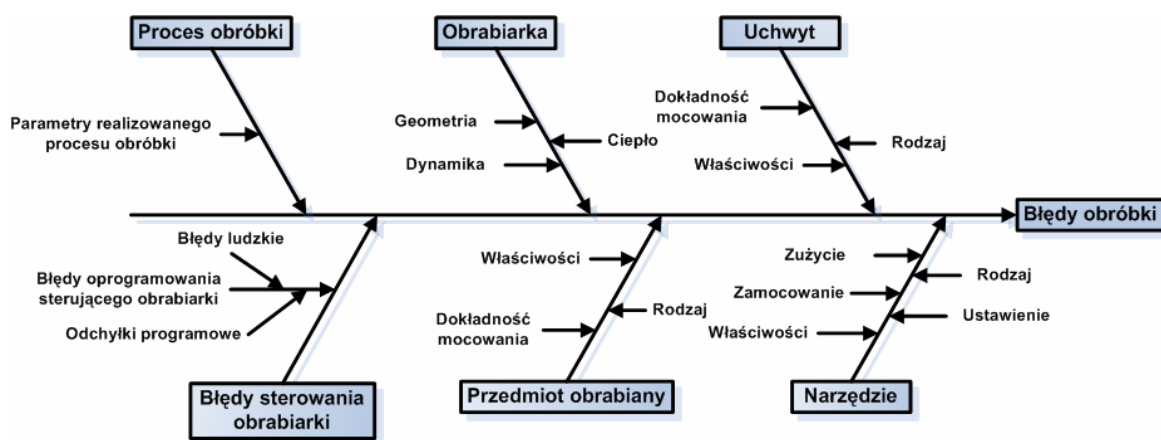
Źródło: opracowanie własne na podstawie: Kaczmarek, 1970; Barakat *et al.*, 2000; Okafor i Ertekin, 2000; Schwenke *et al.*, 2008

2.3.2. Przyczyny błędów obróbki skrawaniem wynikające z błędów elementów układu OUPN

Drugie, szersze spojrzenie na przyczyny błędów obróbki odnosi się nie tylko do samej obrabiarki, ale do całego układu: Obrabiarka – Uchwyt – Przedmiot obrabiany – Narzędzie, nazywanego w skrócie układem OUPN (np. Andrzejewski *et al.*, 1993; Choroszy, 2000). W takim ujęciu, najprostszym podziałem przyczyn błędów obróbki jest podział w odniesieniu do elementów układu OUPN, będących źródłami tych błędów. Podział taki obejmuje w najogólniejszej postaci (Szadkowski, 1994; Estrems *et al.*, 2003; Józwik *et al.*, 2004):

- przyczyny związane z obrabiarką,
- przyczyny związane z uchwytem,
- przyczyny związane z przedmiotem obrabianym,
- przyczyny związane z narzędziem.

Stosując taki podział, Józwik *et al.* (2004) uwzględniają również grupę przyczyn związanych z parametrami realizowanego procesu skrawania, a także dodają grupę „innych czynników losowych”. Natomiast Szadkowski (1994) bierze ponadto pod uwagę grupę przyczyn związanych z programem sterującym – mającą zastosowanie dla obrabiarek sterowanych numerycznie. Zestawienie potencjalnych przyczyn błędów obróbki, wynikające z wyżej omówionego ujęcia, odnoszącego się do poszczególnych elementów układu OUPN, przedstawiono na Rysunku 2.5, w postaci diagramu przyczynowo-skutkowego.



Rys.2.5. Zestawienie przyczyn błędów obróbki w odniesieniu do układu OUPN

Źródło: opracowanie własne na podstawie: Szadkowski, 1994; Estrems *et al.*, 2003; Józwik *et al.*, 2004

2.3.3. Przyczyny błędów obróbki skrawaniem wynikające z czynników oddziałujących na proces obróbki

Często spotykanym, a zarazem najszerszym, sposobem klasyfikacji przyczyn błędów obróbki powstających w ramach układu OUPN, jest podział uwzględniający różnego rodzaju czynniki oddziałujące na proces obróbki. I tak, najczęściej wymieniane grupy przyczyn (Kolman *et al.*, 1969; Theuws, 1991; Andrzejewski *et al.*, 1993; Choroszy, 2000; Ramesh *et al.*, 2000a; Skoczyński, 2001; Estrems *et al.*, 2003; Lee i Yang, 2003; Lopez de Lacalle *et al.*, 2004) to:

- przyczyny wynikające z geometrii maszyny i jej elementów,
- przyczyny związane z oddziaływaniami cieplnymi w układzie OUPN,

Oprócz tego, często uwzględnianymi grupami przyczyn są:

- przyczyny związane ze zużyciem narzędzia (Kolman *et al.*, 1969; Theuws, 1991; Andrzejewski *et al.*, 1993; Ramesh *et al.*, 2000a; Estrems *et al.*, 2003; Lee i Yang, 2003; Lopez de Lacalle *et al.*, 2004),
- przyczyny związane z kinematyką obrabiarki (Andrzejewski *et al.*, 1993; Choroszy, 2000; Ramesh *et al.*, 2000a; Skoczyński, 2001) – które bywają też identyfikowane jako wspólny skutek oddziaływań związanych z geometrią, sztywnością i efektami cieplnymi w układzie (Theuws, 1991).

Inne, uwzględniane w najszerszym ujęciu, grupy przyczyn błędów obróbki, odnoszące się do czynników oddziałujących na proces obróbki, to:

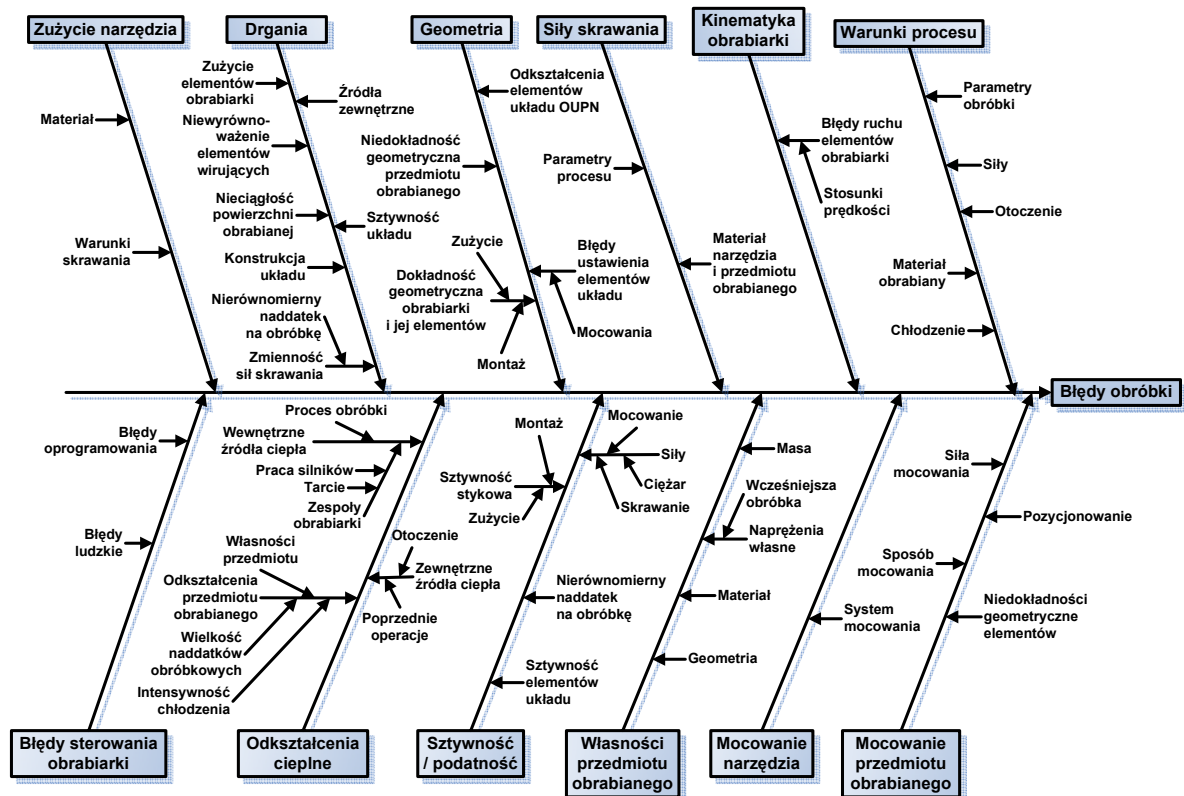
- przyczyny wynikające z błędów nastawienia elementów układu (Kolman *et al.*, 1969; Andrzejewski *et al.*, 1993),
- przyczyny związane z mocowaniem przedmiotu obrabianego (Theuws, 1991; Andrzejewski *et al.*, 1993; Ramesh *et al.*, 2000a),
- przyczyny związane z własnościami przedmiotu obrabianego (Andrzejewski *et al.*, 1993; Choroszy, 2000; Lopez de Lacalle *et al.*, 2004),
- przyczyny związane z mocowaniem narzędzia (Lopez de Lacalle *et al.*, 2004),
- przyczyny wynikające z warunków realizowanego procesu obróbki (Skoczyński, 2001),
- przyczyny związane z siłami skrawania (Andrzejewski *et al.*, 1993; Ramesh *et al.*, 2000a; Lee i Yang, 2003),
- przyczyny związane ze sterowaniem – w przypadku obrabiarek sterowanych numerycznie (Theuws, 1991; Ramesh *et al.*, 2000a; Lopez de Lacalle *et al.*, 2004).

Różne jest podejście do grupy przyczyn związanych z oddziaływaniami dynamicznymi w układzie OUPN. Estrems *et al.* (2003) wyróżniają ogólną grupę przyczyn związanych z oddziaływaniem dynamicznym. Natomiast Kolman *et al.* (1969), Theuws (1991), Choroszy (2000), Skoczyński (2001) oraz Lopez de Lacalle *et al.* (2004) uwzględniają w formie odrębnych grup przyczyn takie czynniki wpływające na oddziaływania dynamiczne w układzie jak:

- sztywność / podatność układu OUPN,
- drgania układu OUPN.

Oczywiście sztywność (lub też podatność) obrabiarki, jak i całego układu OUPN jest również związana z potencjalnymi odkształceniami statycznymi układu, które zostały uwzględnione np. przez Skoczyńskiego (2001) jako odrębna grupa przyczyn błędów obróbki. Ponadto, Kolman *et al.* (1969) wyróżniają grupę przyczyn błędów obróbki związaną z bezwładnością mas, a w niektórych wyróżnionych przez siebie grupach przyczyn (takich jak podatność, ścieralność, odkształcenia cieplne) oddzielają przyczyny oddziałujące statycznie od przyczyn związanych z dynamicznymi oddziaływaniami w układzie.

Zestawienie najważniejszych przyczyn błędów obróbki, wraz z ich przyporządkowaniem do grup wynikających z prezentowanych w literaturze klasyfikacji, opierających się na najszerszym ujęciu odnośnie różnego rodzaju czynników oddziałujących na proces obróbki, przedstawiono na Rysunku 2.6, w formie diagramu przyczynowo-skutkowego.



Rys.2.6. Zestawienie głównych przyczyn błędów obróbki w odniesieniu do czynników oddziałujących na proces obróbki

Źródło: opracowanie własne na podstawie: Kolman *et al.*, 1969; Theuws, 1991; Andrzejewski *et al.*, 1993; Choroszy, 2000; Ramesh *et al.*, 2000a, 2000b; Skoczyński, 2001; Estrems *et al.*, 2003; Lee i Yang, 2003; Lopez de Lacalle *et al.*, 2004

2.3.4. Przyczyny błędów obróbki skrawaniem wynikające z oddziaływań statycznych i dynamicznych występujących w procesie obróbki

Kwestia podziału na statyczne i dynamiczne przyczyny błędów obróbki nie jest jednoznaczna, albowiem oddzielenie tych dwóch rodzajów oddziaływań w rzeczywistości może być trudne. Dlatego, jednym ze stosowanych sposobów podziału przyczyn błędów obróbki jest dokonanie umownego podziału na tzw. oddziaływania quasi-statyczne oraz oddziaływania dynamiczne. Jak określa to Zhu (2008), oddziaływania quasi-statyczne to takie, które pojawiają się stosunkowo wolno (a więc siły działają bez dużych przyspieszeń), natomiast oddziaływania dynamiczne są dużo bardziej zależne od konkretnych warunków pracy maszyny.

Do głównych oddziaływań quasi-statycznych, mających wpływ na błędy obróbki, zalicza się (Ramesh *et al.*, 2000a; Barakat *et al.*, 2000; Liu, 2001; Lee i Yang, 2003; Yau *et al.*, 2004; Zhu, 2008):

- zależności geometryczne i/lub kinematyczne układu,
- oddziaływania cieplne w układzie,
- oddziaływania wynikające z obciążeń elementów układu.

Wśród innych przyczyn błędów obróbki, zaliczanych do grupy oddziaływań quasi-statycznych, wymienia się (Liu, 2001):

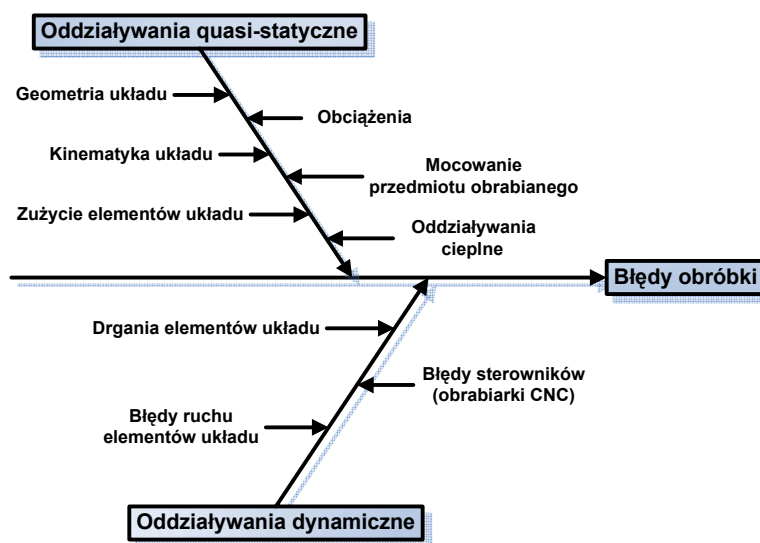
- oddziaływania związane ze zużyciem elementów układu,

- oddziaływanie wynikające z siły mocowania przedmiotu obrabianego.

Oddziaływania dynamiczne wpływające na błędy obróbki to (Ramesh *et al.*, 2000a; Yau *et al.*, 2004; Zhu, 2008):

- błędy sterowników – w przypadku obrabiarek sterowanych numerycznie, a także (Ramesh *et al.*, 2000a, 2004; Zhu, 2008):
- oddziaływania wynikające z drgań elementów układu,
- błędy ruchu elementów układu.

Na Rysunku 2.7 przedstawiono, w postaci diagramu przyczynowo-skutkowego, zestawienie potencjalnych przyczyn błędów obróbki, wynikające z ujęcia, według którego dzieli się te przyczyny, zgodnie z rodzajem oddziaływania, na quasi-statyczne oraz dynamiczne.



Rys.2.7. Zestawienie przyczyn błędów obróbki z uwzględnieniem oddziaływań quasi-statycznych i dynamicznych

Źródło: opracowanie własne na podstawie: Ramesh *et al.*, 2000a; Barakat *et al.*, 2000; Liu, 2001; Lee i Yang, 2003; Yau *et al.*, 2004; Zhu, 2008

Udział poszczególnych przyczyn (lub grup przyczyn) w całkowitym błędzie obróbki, będącym rezultatem realizowanego procesu jest różny i często zależy od sposobu obróbki.

W odniesieniu do samej obrabiarki, uważa się, że za jej dokładność odpowiadają przede wszystkim błędy wynikające z oddziaływań quasi-statycznych (a więc związane głównie z geometrią, kinematyką, oddziaływaniami cieplnymi, a także obciążeniami) i stanowią one ok. 70% jej całkowitego błędu (Theuws, 1991; Ramesh *et al.*, 2000a; Barakat *et al.*, 2000; Liu, 2001; Zhu, 2008). W związku z tym, w niektórych analizach błędów obrabiarki pomija się oddziaływania dynamiczne.

Jednak założenia wynikające z tego rodzaju uogólnień nie zawsze są prawdziwe. Istnieje szereg szczególnych przypadków, które zaprzeczają takim założeniom. Na przykład przy obróbce z dużymi prędkościami skrawania (ang. *High Speed Cutting*, HSC) błędy dynamiczne mogą być dużo większe od błędów statycznych obrabiarki (Yau *et al.*, 2004). Z kolei w przypadku obróbki wykończeniowej, gdzie szczególnie ważna jest dokładność

obróbki, uważa się, że największy udział w błędach wymiarowych wyrobu mają przyczyny wynikające z oddziaływań termicznych (Florussen *et al.*, 2003). Również w przypadku obróbki precyzyjnej błędy termiczne uważane są za największe źródło błędów obrabiarki – według Hao *et al.* (2008) odpowiadają one za 70% błędów obróbki.

Ponadto, pomimo że analiza przyczyn błędów obróbki w literaturze często ogranicza się tylko do rozpatrywania czynników związanych z układem OUPN lub nawet wyłącznie z samą obrabiarką, nie należy zapominać, że w warunkach rzeczywistych na błąd obróbki wpływ mają też inne czynniki. Lee i Yang (2003) oceniają, że błędy wyrobu wynikają:

- w 60-65% z przyczyn bezpośrednio związanych z obrabiarką,
- w 30-35% z przyczyn wynikających z procesu,
- w 5-10% z przyczyn wynikających z otoczenia procesu.

Przyczyna powstałego błędu obróbki może zatem leżeć w różnych obszarach i wynikać z wielu różnych oddziaływań, które powinny być brane pod uwagę w działaniach zmierzających do minimalizacji powstających błędów, a tym samym do redukcji zmienności w procesach obróbki skrawaniem.

2.3.5. Przyczyny błędów obróbki w procesach obróbki skrawaniem – podsumowanie

Podsumowując, należy zauważyć, że:

- Błędy obróbki skrawaniem, których wartość jest miarą jakości wyrobów i wytwarzających je procesów, wynikać mogą z wielu różnych przyczyn.
- Przyczyny błędów obróbki skrawaniem mogą być związane zarówno z własnościami obrabiarki, jak i pozostałych elementów układu OUPN, a także ich wzajemnymi relacjami oraz innymi czynnikami oddziałującymi na proces obróbki.
- Przy poszukiwaniu przyczyny powstającego błędu obróbki należy mieć na uwadze jak najszerszy zbiór potencjalnych przyczyn.

2.4. Redukcja zmienności w procesach obróbki skrawaniem

Zmienność, objawiająca się w procesach obróbki skrawaniem w postaci błędów obróbki wyrobu, jest minimalizowana poprzez szereg różnego rodzaju działań. Przede wszystkim, dąży się do uzyskania jak najmniejszego wpływu potencjalnych przyczyn błędów związanych z obrabiarką, poprzez optymalizację jej konstrukcji i wysoką dokładność wykonania. Przed przekazaniem do produkcji, obrabiarki są szczegółowo sprawdzane, a ich dokładność – przede wszystkim geometryczna – badana za pomocą szeregu szczegółowych pomiarów. Ponadto, na etapie projektowania obrabiarki oraz procesu obróbki, dąży się m.in. do minimalizacji oddziaływań cieplnych, poprzez zastosowanie odpowiednich materiałów oraz systemów chłodzenia. Zatem już samo konstruowanie obrabiarki oraz projektowanie procesu obróbki zawiera w sobie wiele działań mających zapobiegać nadmiernej zmienności procesu, który ma być realizowany.

Oczywiście, pomimo starań włożonych w zapobieganie powstawaniu błędów obróbki na etapie projektowania obrabiarki oraz procesu obróbki, istnieje pewna granica możliwej do osiągnięcia dokładności, a zatem zmienność jest nieunikniona. Poza tym, niektóre z możliwych do zastosowania na tym etapie sposobów minimalizacji błędów obróbki, takie jak na przykład stosowanie do budowy obrabiarek materiałów o podwyższonej odporności na oddziaływania cieplne (np. beton cementowy czy materiały kompozytowe), są zwykle bardzo

drogie (Ramesh *et al.*, 2000b). Oprócz ograniczeń technologicznych, istotną rolę przy projektowaniu procesów obróbki odgrywają także ograniczenia ekonomiczne, wpływające na tzw. ekonomiczny poziom dokładności, możliwy do osiągnięcia przy zachowaniu opłacalności produkcji. Możliwe do osiągnięcia w przeciętnych warunkach produkcyjnych, tzw. „ekonomiczne” zakresy dokładności i chropowatości, dla różnych sposobów i rodzajów obróbki, podają np.: Choroszy (2000, s.84), Cichosz (2004, s.290).

Dlatego, w dalszej kolejności, redukcja zmienności w procesach obróbki jest w dużej mierze realizowana poprzez tzw. kompensację błędów obróbki. Zagadnienie kompensacji odnosi się głównie do samej obrabiarki i polega na monitorowaniu oraz przewidywaniu jej niedokładności i kompensowaniu ich skutków. Wyróżnić można dwa rodzaje kompensacji błędów obróbki:

- kompensację on-line (nazywaną także kompensacją w toku procesu lub kompensacją w czasie rzeczywistym) – która odbywa się podczas przebiegu procesu,
- kompensację off-line (nazywaną także kompensacją poza tokiem procesu) – która odbywa się poza przebiegiem samego procesu.

Kompensacja błędów on-line prowadzona jest ciągle podczas pracy obrabiarki i dlatego jej zastosowanie ogranicza się do obrabiarek sterowanych numerycznie (CNC). Polega ona z reguły na monitorowaniu sygnałów pozwalających przewidywać wybrane czynniki związane z błędami obróbki w odniesieniu do obrabiarki (czyli tzw. błędy obrabiarki, zestawione na Rysunku 2.4) podczas procesu obróbki i wykorzystywaniu tych pomiarów do ewentualnej korekty sterowania obrabiarki podczas tej samej operacji. System kompensacji błędów obróbki on-line może być integralną częścią nowej obrabiarki, ale może także być zainstalowany w istniejącej obrabiarence w celu poprawy jej dokładności obróbki.

Natomiast kompensacja błędów obróbki off-line odbywa się poza przebiegiem procesu obróbki i najczęściej jest realizowana przez takie działania, jak:

- Dokonywanie pomiaru wybranych wielkości związanych z procesem (najczęściej są to bezpośrednie pomiary obrobionego wyrobu) i wykorzystywanie ich do dokonywania poprawek w procesie (najczęściej w odniesieniu do sterowania obrabiarki) przy obróbce kolejnego wyrobu;
- Zastosowanie modeli i symulacji, umożliwiających doskonalenie procesu poza jego przebiegiem.

Ponieważ w tym przypadku ewentualne zmiany nie są dokonywane w procesie w czasie rzeczywistym, dlatego skuteczna kompensacja błędów obróbki off-line może być realizowana w przypadku procesów powtarzalnych.

Aby kompensacja (głównie on-line, ale także off-line) błędów obróbki była możliwa, z reguły potrzebna jest znajomość zależności istniejącej pomiędzy wielkościami monitorowanymi (związanymi z błędami obróbki) a wielkościami regulowanymi w procesie (związanymi z czynnikami wpływającymi na powstawanie tych błędów). Analiza tych zależności jest przedmiotem wielu prac, które obejmują zarówno:

1. badania wpływu wybranych, pojedynczych czynników na osiąganą dokładność obróbki,
jak i
2. modelowanie wpływu wielu czynników na dokładność obróbki w ujęciu bardziej całościowym.

Ponadto, w literaturze z zakresu technologii obróbki skrawaniem, zawarte są także:

3. rozważania teoretyczne, w których podawanych jest wiele cennych informacji wskazujących na potencjalne przyczyny błędów obróbki powstających w procesach obróbki skrawaniem.

W dalszej części tego rozdziału omówiono każde z tak zidentyfikowanych trzech głównych podejść do redukcji zmienności w procesach obróbki skrawaniem, dokonując przeglądu przykładowych zastosowań w ramach każdego podejścia.

2.4.1. Podejście polegające na analizie wpływu poszczególnych czynników na powstawanie błędów obróbki

Badania obejmujące analizę wpływu wybranych przyczyn (lub grup przyczyn) na powstawanie błędów obróbki – prowadzone głównie (choć nie wyłącznie) w ramach działań związanych z kompensacją błędów obróbki on-line – dotyczą między innymi takich czynników, jak:

1) Błędy geometryczne i kinematyczne obrabiarki, np.:

- Wilhelm *et al.* (1997) przedstawiają wyniki badań przeprowadzonych na trzy-osiowym poziomym centrum obróbkowym w celu identyfikacji wpływu poszczególnych błędów geometrycznych maszyny na błędy przedmiotu obrabianego; Przy użyciu zaproponowanej przez nich metody możliwe było przewidzenie nawet do 80% błędów wyrobu, na podstawie pomiarów błędów geometrycznych obrabiarki;
- Ramesh *et al.* (2000a) omawiają zależności pomiędzy błędami geometrycznymi i kinematycznymi obrabiarki a błędami obróbki, a także przedstawiają różne sposoby kompensacji tych błędów;
- Chen i Bin (2001) przedstawiają strategię kompensacji błędów kinematycznych układu OUPN, opierającą się na opracowywanym dla każdego danego układu specyficznym modelu (tzw. mapie błędów – ang. *error map*) wiążącym błędy przedmiotu obrobionego z błędami układu OUPN. Prezentowana metoda ma zastosowanie w obróbce precyzyjnej i jest częściowo stosowana off-line, a częściowo on-line (kompensacja oddziaływania sił i temperatury);
- Schwenke *et al.* (2008) prezentują przegląd sposobów pomiaru błędów geometrycznych obrabiarki, które mogą służyć do pozyskania danych przydatnych zarówno do kompensacji błędów obróbki off-line (mechanicznych korekt elementów obrabiarki), jak i on-line.

2) Błędy geometryczne i błędy wynikające z oddziaływań cieplnych, np.:

- Theuws (1991) przedstawia metodę kompensacji błędów obróbki powstających na pięcio-osiowej frezarce, wykorzystującą model odzwierciedlający wpływ jej błędów geometrycznych i termicznych na powstające błędy obróbki;
- Okafor i Ertekin (2000) wyprowadzają model matematyczny uwzględniający błędy geometryczne i termiczne trzy-osiowego pionowego centrum obróbkowego, który może służyć do kompensacji błędów obróbki.

3) Błędy wynikające z oddziaływań cieplnych, np.:

- Ramesh *et al.* (2000b) omawiają zależności pomiędzy oddziaływaniami cieplnymi a błędami obróbki, a także przedstawiają przegląd sposobów modelowania zależności termicznych występujących w obrabiarkach;

- Mitsuiishi *et al.* (2001) prezentują metodę kompensacji odkształceń termicznych centrum obróbkowego do obróbki z dużymi prędkościami, przy użyciu czujników odkształceń;
- Józwik (2002) przedstawia metodę wykorzystującą kamerę termograficzną do pomiaru temperatury przedmiotu obrabianego oraz narzędzia podczas obróbki. Metoda ta może zostać wykorzystana w systemie kompensacji błędów obróbki związanych z odkształceniami cieplnymi;
- Florussen *et al.* (2003) proponują metodę pomiaru odkształceń termicznych obrabiarki polegającą na zastosowaniu teleskopowego pręta zakończonego przegubami kulistymi (ang. *telescopic double ball bar*, TDBB) oraz przedstawiają opracowany model błędów termicznych obrabiarki;
- Brecher i Hirsch (2004) przedstawiają metodę kompensacji odkształceń termicznych poprzez monitorowanie stanu termicznego obrabiarki na podstawie pozyskiwanych z jej układu sterującego danych dotyczących intensywności wewnętrznych źródeł ciepła, takich jak silniki, łożyska i przekładnie śrubowe;
- Jędrzejewski *et al.* (2007) prezentują szczegółowy model termiczny obrabiarki przeznaczonej do obróbki z dużymi prędkościami, uwzględniający nie tylko oddziaływanie temperatur na strukturę obrabiarki, ale także na jej systemy pomiarowe;
- Hao *et al.* (2008) przedstawiają model błędów termicznych obrabiarki, który ma służyć jako podstawa systemu kompensacji w czasie rzeczywistym dla obróbki precyzyjnej;
- Zhu (2008) prezentuje podejście do modelowania i kompensacji błędów termicznych w ramach metody doskonalenia dokładności pięcio-osiowej obrabiarki. Praca obejmuje także propozycję odpowiedniego sposobu rozmieszczenia czujników temperatury na obrabiarce, optymalnego dla prezentowanej metody.

4) Błędy wynikające z oddziaływań dynamicznych, np.:

- Yau *et al.* (2004) przedstawiają model symulacyjny, który może być zastosowany jako sprawdzenie poprawności programu sterowania obrabiarki CNC przed przystąpieniem do obróbki, a także w czasie rzeczywistym podczas obróbki w celu umożliwienia kompensacji tych błędów. Model dotyczy obróbki z dużymi prędkościami, w przypadku której błędy dynamiczne są znaczące.

5) Warunki obróbki, np.:

- Yang *et al.* (1997) proponują system kompensacji (w czasie rzeczywistym) błędów wywołanych przez siły skrawania podczas tzw. obróbki na twardo na dwu-osiowym centrum tokarskim;
- Ramesh *et al.* (2000a) przedstawiają różne sposoby kompensacji błędów obróbki wynikających z oddziaływania sił skrawania, których wpływ na dokładność obróbki jest szczególnie istotny w przypadku tzw. obróbki na twardo, gdzie siły skrawania osiągają znaczne wartości;
- Liu (2001) prezentuje metodę kompensacji błędów wywołanych przez składową promieniową siłę skrawania (analizowany jest jej wpływ na odkształcenia układu OUPN) w operacji toczenia;
- Józwik *et al.* (2004) przedstawiają opracowany model wiążący parametry skrawania z odchyłkami kształtu (walcowości i okrągłości) i wymiaru tulei cienkościennej ze stali węglowej konstrukcyjnej, powstającymi w procesie toczenia na tokarce uniwersalnej;

6) Błędy związane z narzędziem, np.:

- Aoyama i Inasaki (2001) przedstawiają analizę wpływu sposobu mocowania narzędzia na jego sztywność dynamiczną, oraz chropowatość powierzchni obrabianej wyrobu;
- Cichosz i Petyniak (2003) prezentują wyniki badania wpływu niewyważenia obrotowych narzędzi skrawających na dokładność wytaczanych otworów (średnicę i okrągłość);
- Lopez de Lacalle *et al.* (2004) przedstawiają analizę wpływu parametrów obróbki na ugięcie narzędzia (wpływające bezpośrednio na błędy wymiarowe wyrobu) podczas obróbki utwardzanej stali w procesie frezowania z dużymi prędkościami.

7) Mocowanie przedmiotu obrabianego, np.:

- Liao i Hu (2001) prezentują opracowany za pomocą metody elementów skończonych model symulacyjny systemu mocowania przedmiotu obrabianego, pozwalający przewidywać jakość obrabianej powierzchni;
- Estrems *et al.* (2003) przedstawiają metodę obliczenia błędu wymiaru wyrobu w zależności od parametrów związanych z dokładnością mocowania oraz z kształtem i wymiarami przedmiotu obrabianego;
- Ramesh *et al.* (2000a) omawiają zależności pomiędzy mocowaniem przedmiotu obrabianego a błędami obróbki, a także przedstawiają sposoby pomiaru i kompensacji tego rodzaju błędów.

8) Błędy geometryczne obrabiarki i ogólne warunki procesu, np.:

- Lee i Yang (2003) proponują sposób modelowania wpływu błędów wynikających z samej obrabiarki (błędów geometrycznych obrabiarki) oraz błędów wynikających z procesu (siły skrawania, sterowanie, otoczenie) na błędy wyrobu, w celu umożliwienia zastosowania kompensacji;
- Miko (2002) przedstawia wyniki badania zależności pomiędzy czynnikami związanymi z obrabiarką, narzędziem i przedmiotem obrabianym, a chropowatością powierzchni wyrobu we frezowaniu walcowym.

Podsumowując, należy zauważyć, że badania zależności pomiędzy powstającymi błędami obróbki a ich przyczynami – prowadzone najczęściej w ramach zagadnienia kompensacji błędów obróbki – posiadają następujące cechy charakterystyczne:

- Dotyczą w przeważającej ilości przypadków wyłącznie wpływu błędów obrabiarki na powstające niedokładności (głównie wymiarowe / geometryczne) wyrobu;
- Ukierunkowane są przede wszystkim na te źródła błędów obróbki, które uważane są za mające największy udział w błędach wyrobu (a więc geometryczne, kinematyczne i termiczne);
- Koncentrują się na kompensacji, a nie na szukaniu przyczyn powstających błędów obróbki;
- Skupiają się najczęściej na jednym głównym czynniku powodującym błąd obróbki, podczas gdy pomijany jest wpływ innych potencjalnych przyczyn, a także interakcje pomiędzy nimi; Niektórzy autorzy przyznają jednak, że aby uzyskać pełny model konieczne jest uwzględnienie wszystkich źródeł błędów obróbki oraz ich wzajemnych oddziaływań (np. Wilhelm *et al.*, 1997; Ramesh *et al.*, 2000a; Liu, 2001; Estrems *et al.*, 2003; Schwenke *et al.*, 2008), choć jednocześnie zauważają, że zależności te są skomplikowane i trudne do oszacowania (Jóźwik *et al.*, 2004);

- Opierają się na pewnych uproszczeniach (np. dotyczących charakteru liniowego badanych zależności), które pozwalają na opracowanie modelu zależności błędów obróbki od zadanych przyczyn, ale jednocześnie ograniczają jego stosowalność (np. Chen i Bin, 2001);
- Prowadzone są zwykle na przykładzie konkretnego układu OUPN, w specyficznych warunkach obróbki, co powoduje, że opracowany model może nie mieć zastosowania w układzie, w którym choć jeden z czynników zostanie zmieniony (np. inna obrabiarka, narzędzie, przedmiot obrabiany, uchwyt, warunki obróbki, itp.), przez co najczęściej w takiej sytuacji konieczne jest sprawdzenie jego adekwatności oraz ewentualne uaktualnienie lub opracowanie nowego modelu (np. Wilhelm *et al.*, 1997; Chen i Bin, 2001; Lee i Yang, 2003);
- Z reguły wymagają przeprowadzenia żmudnych i czasochłonnych, a w efekcie kosztownych eksperymentów, w celu pozyskania dużych ilości danych dotyczących składowych danego błędu obróbki (Ramesh *et al.*, 2000b).

Ponadto, w odniesieniu do samej kompensacji błędów obróbki on-line, istnieją następujące ograniczenia:

- Ze względu na sposób sterowania, może być ona stosowana tylko w przypadku obrabiarek sterowanych numerycznie (CNC) (Ramesh *et al.*, 2000a);
- Wymaga ona opracowania i stosowania odpowiednich sposobów pomiaru wartości czynników wpływających na powstawanie błędów obróbki, które to sposoby pomiaru są z reguły trudne i skomplikowane, a pomiar niektórych błędów jest wręcz niemożliwy (Lee i Yang, 2003);
- Jej skuteczność zależy w bardzo dużym stopniu od powtarzalności samej maszyny (Ramesh *et al.*, 2000a; Zhu, 2008);
- Wymaga ona znajomości zależności pomiędzy czynnikami monitorowanymi a wielkościami korygowanymi i przełożenia tej wiedzy na odpowiedni model (Zhu, 2008);
- Koszt systemu kompensacji musi być niższy od zysków wynikających z podniesionej dokładności obróbki (Ramesh *et al.*, 2000a).

Warto przy tym zauważyć, że kompensacja błędów obróbki on-line jest dziedziną dynamicznie się rozwijającą, zatem można oczekiwać, że wiele z obecnie istniejących ograniczeń zostanie w przyszłości przewyżczonych.

2.4.2. Podejście polegające na modelowaniu wspólnego wpływu wielu czynników na powstawanie błędów obróbki

Oprócz wielu analiz dotyczących zależności pojedynczych czynników wpływających na zmienność w procesach obróbki, podejmowane są też badania mające na celu opracowanie metody pozwalającej na modelowanie zmienności w procesach produkcyjnych obejmującej bardziej całościowo czynniki wywołujące tę zmienność. Do takich metod zaliczyć można:

1) SOVA

W literaturze dotyczącej zmienności w procesach produkcyjnych w roku 1997 pojawiło się pojęcie „Stream of Variation” (Hu, 1997), co można przetłumaczyć jako „strumień zmienności”. Pojęcie to, zaproponowane przez naukowców z Uniwersytetu Wisconsin-Madison w Stanach Zjednoczonych, oraz tematyka z nim związana stały się

podstawą dwóch projektów opracowywanych później na tym uniwersytecie (Stream Of Variation (SOVA) Research Roadmap, 2004). Za cel tych projektów postawiono „opracowanie systemu symulacji komputerowej służącego do modelowania, analizy, przewidywania i optymalizacji działania wieloetapowego procesu wytwórczego”. Opracowane oprogramowanie miało służyć do zarządzania zmiennością procesu wytwarzania i umożliwić diagnozowanie przyczyn źródłowych błędów wymiarowych wyrobu, a także zalecać odpowiednie rozwiązania. Zastosowanie wyników projektów w rzeczywistych procesach wytwórczych miało przynieść liczne korzyści, takie jak oszczędności finansowe, poprawę produktywności i jakości, a także skrócenie cykli rozwoju wyrobu. Pierwszy z planowanych projektów miał dotyczyć analizy „strumienia zmienności” związanego z wieloetapowym procesem montażu (Stream Of Variation Analysis (SOVA), 2004), natomiast drugi – modelowania „strumienia zmienności” w wieloetapowym procesie wytwarzania (Stream Of Variation Modeling (SOVA), 2004).

Objęta tymi projektami tematyka analizy i modelowania „strumienia zmienności” – określana często skrótem oryginalnej nazwy: SOV lub SOVA – była i do tej pory jest rozwijana, głównie przez naukowców związanych z Uniwersytetem Wisconsin-Madison, co znajduje szerokie odzwierciedlenie w literaturze. Analiza publikacji związanych z analizą strumienia zmienności (SOVA) pozwala zapoznać się z pracami prowadzącymi do sformułowania wspomnianych projektów, efektami ich realizacji, jak i z ogólnym rozwojem tematyki „strumienia zmienności”.

Ceglarek *et al.* (2004) definiują SOVA jako „ogólny model matematyczny służący do analizy propagacji zmienności w wieloetapowych procesach wytwórczych”. SOVA ma łączyć we wspólne ramy takie zagadnienia jak: analiza statystyczna, teoria sterowania, a także wiedza związana z projektowaniem i wytwarzaniem – w postaci modeli CAD/CAM. Proponowana metoda ma służyć do:

- symulacji propagacji zmienności w procesie w celu przewidywania zmienności wymiarowej wyrobu końcowego, a także do
- identyfikacji największych błędów wymiarowych i wskazania krytycznych operacji przyczyniających się do powstawania tych błędów oraz ich przyczyn źródłowych.

W ramach metody SOVA wykorzystuje się m.in.:

- tzw. Model przestrzeni stanów (ang. *State Space Model*) – w celu opisanego związku pomiędzy błędami mocowania a błędami wymiarowymi wyrobu i ich propagacji w procesie (Ding *et al.*, 2002),
- metodę tzw. Analizy głównych składowych (ang. *Principal Component Analysis*, PCA) – służącą do analizy dużych zbiorów danych, które zostają zebrane przy pomiarze wyrobu końcowego przy użyciu współrzędnościowych maszyn pomiarowych, i pozwalającą zlokalizować w procesie miejsce powstania błędów (Hu, 1997; Ding *et al.*, 2002).

Zastosowanie metody SOVA w procesach montażu pozwoliło m.in. na (Hu, 1997; Ding *et al.*, 2002; Ceglarek *et al.*, 2004):

- opisanie zależności pomiędzy przyczynami błędów związanymi z procesem (głównie błędami mocowania) a błędami wyrobu końcowego;
- identyfikację największych błędów wymiarowych wyrobu i wskazanie operacji, w której błędy te powstały.

Zastosowanie metody SOVA w procesach obróbki skrawaniem przyczyniło się przede wszystkim do opracowania modelu symulacyjnego służącego do opisu propagacji zmienności

wymiarowej w wieloetapowym procesie obróbki (Zhou *et al.*, 2003; Djurdjanovic i Ni, 2006; Loose *et al.*, 2007). Autorzy zwracają jednak uwagę na znaczne ograniczenia stosowalności tej metody do analizy procesów obróbki. Wymieniane są następujące główne ograniczenia metody SOVA:

- Model uwzględnia wnoszone w każdej operacji uogólnione błędy obróbki (odchylenie ścieżki narzędzia od ścieżki nominalnej), błędy mocowania oraz błędy wymiarowe powstałych w poprzednich operacjach. Błąd obróbki nie jest dekomponowany na swoje rzeczywiste składowe, takie jak błędy geometryczne, termiczne, zużycie narzędzia, i inne (Zhou *et al.*, 2003; Djurdjanovic i Ni, 2006). Dodatkowo, Loose *et al.* (2007) zauważają, że utworzenie pełnego modelu odzwierciedlającego wszystkie czynniki i zależności wpływające na błędy wyrobu byłoby „bardzo trudne, jeśli nie niemożliwe”.
- W związku z powyższym, model umożliwia jedynie identyfikację etapu procesu, w którym powstał dany błąd przedmiotu obrabianego, a nie identyfikację rzeczywistej przyczyny źródłowej tego błędu (Zhou *et al.*, 2003).
- Metoda SOVA uwzględnia jedynie zależności kinematyczne związane z błędami wymiarów w procesach obróbki i wymaga dalszych prac w celu rozszerzenia o inne rodzaje błędów wyrobu, np. związane z jakością powierzchni, a także uwzględnienia wpływu sił, własności materiału i oddziaływań dynamicznych w procesie obróbki (Djurdjanovic i Ni, 2006).
- Proponowany model jest modelem liniowym, a zatem daje dobre wyniki w prostych procesach, jednak w przypadku próby zastosowania metody SOVA dla procesów złożonych z większej ilości operacji i bardziej skomplikowanych wyrobów, linearyzacja może powodować błędy – metoda wymaga dalszych prac w tym kierunku (Ding *et al.*, 2002; Loose *et al.*, 2007).

Próbując przezwyciężyć niektóre z ograniczeń metody SOVA, Agapiou *et al.* (2003) rozwijają ją i proponują metodę „QUALITY”, pozwalającą przewidywać błędy wyrobu, która:

- uwzględnia wiele typowych przyczyn błędów obróbki,
- uwzględnia różne rodzaje błędów wyrobu,
- wymaga posłużenia się programem komputerowym (3DCS) w celu wykonania symulacji propagacji błędów w procesie oraz w celu stworzenia modelu analizowanego wyrobu,
- wymaga od użytkownika utworzenia modelu powstawania błędów obróbki – określającego wpływ rozpatrywanych czynników na błędy wyrobu – w ramach każdej z analizowanych operacji, dla każdego rozpatrywanego przypadku,
- pozwala przewidzieć wielkość udziału poszczególnych przyczyn w całkowitej zmienności danej cechy jakościowej wyrobu.

Podsumowując, metody analizy zmienności w procesach wytwórczych oparte na podejściu „strumienia zmienności” (ang. *Stream of Variation*, SOVA):

- dotyczą analizy propagacji zmienności w wieloetapowych procesach wytwórczych (montażu lub obróbki),
- mogą być stosowane w procesach, w których błędy wyrobu są monitorowane automatycznie za pomocą współrzędnościowego systemu pomiarowego,
- wymagają stworzenia i zastosowania modelu, wykorzystującego skomplikowany aparat matematyczny,

- najczęściej uwzględniają jedynie błędy wymiarowe wyrobu,
- uwzględniają pojedyncze przyczyny błędów obróbki, nie biorąc pod uwagę skomplikowanych zależności zachodzących pomiędzy tymi przyczynami w rzeczywistych procesach.
- skupiają się przede wszystkim na wskazaniu miejsca (operacji) w którym powstał błąd.

2) MVA (ang. *Machining Variation Analysis*) – czyli „analiza zmienności obróbki skrawaniem”

Jest to narzędzie w postaci programu komputerowego, opracowane przy udziale naukowców z Massachusetts Institute of Technology, pozwalające w wyniku symulacji estymować dokładność i powtarzalność wyrobów na podstawie błędów obrabiarek (Puttre, 1998). Program ten:

- wymaga od użytkownika wprowadzenia informacji dotyczących geometrii wyrobu oraz źródeł błędów związanych z analizowaną obrabiarką;
- w wyniku symulacji pracy obrabiarki (ang. *Virtual Machining*) umożliwia przewidzenie kształtu przedmiotu obrobionego (biorąc pod uwagę jego błędy wymiarowe i geometryczne), uwzględniając konsekwencje określonych wcześniej źródeł błędów, dzięki czemu pomaga w optymalizacji projektu obrabiarki.

3) *Error budgeting* (ang.) – czyli „budżetowanie” bądź „planowanie” błędów

Jest to systematyczne podejście do przewidywania i kontroli całkowitych błędów obrabiarki i dokładności przedmiotów obrabianych, tak aby żaden ze składników błędu nie przekroczył specyfikacji. Na pojęcie *error budgeting* składają się dwa zagadnienia (Ramesh *et al.*, 2000a; Zhu, 2008):

- analiza („*error budget analysis*”, wnioskowanie „w przód”) – polegająca na przewidywaniu wpływu całościowych błędów geometrycznych obrabiarki na dokładność wyrobu, przy znanym lub założonym rozkładzie błędów obrabiarki;
- synteza („*error budget synthesis*”, wnioskowanie „w tył”) – polegająca na przypisaniu ogólnych zmienności wymiarowych (geometrycznych) wyrobu poszczególnym elementom obrabiarki.

Na podstawie metody *error budgeting* możliwe jest takie zaplanowanie dopuszczalnych poziomów każdego z analizowanych błędów obrabiarki, aby osiągnięta w efekcie zmienność wyrobów nie przekraczała dopuszczalnych granic.

Przedstawiane w literaturze przykłady *error budgeting* dotyczą wyłącznie błędów obróbki wynikających z błędów obrabiarki i skupiają się na jej błędach geometrycznych i kinematycznych. Przy wykorzystaniu tej metody zakłada się, że błędy wymiarowe wyrobu odpowiadają wprost błędom geometrycznym obrabiarki. Inne przyczyny błędów obróbki (zarówno te związane z obrabiarką, jak i pochodzące z innych źródeł, takich jak proces czy narzędzie), oraz inne rodzaje błędów wyrobu (np. błędy powierzchni) nie są tu uwzględniane.

Podsumowując, można stwierdzić, że metody całościowego modelowania i symulacji zmienności w procesach produkcyjnych:

- opierają się na pewnych, omówionych wyżej, uproszczeniach,

- wymagają znajomości zależności występujących pomiędzy modelowanymi błędami obróbki a czynnikami wpływającymi na ich powstawanie,
- skupiają się na przewidywaniu skutków zachodzących oddziaływań, a także identyfikacji operacji, w której powstał dany błąd, jednak nie wskazują bezpośrednich przyczyn powstających błędów obróbki.

2.4.3. Podejście polegające na wskazywaniu potencjalnych przyczyn błędów obróbki, w oparciu o wiedzę teoretyczną

Oprócz całościowych modeli zależności zachodzących pomiędzy czynnikami występującymi w procesach obróbki a jej wynikami, analiza literatury z zakresu obróbki skrawaniem pozwala znaleźć również wiele informacji o charakterze teoretycznym, dotyczących poszczególnych potencjalnych przyczyn powstających błędów obróbki. Informacje takie wydają się najbardziej użyteczne w sytuacji, gdy działania doskonalące zmierzające do poprawy dokładności obróbki skupiane są na szukaniu przyczyny powstałego błędu obróbki, a nie na jego kompensacji.

Dość szeroki przegląd potencjalnych przyczyn błędów obróbki wraz z omówieniem ich powiązań z poszczególnymi rodzajami błędów, jakie mogą powodować, przedstawiają między innymi Kolman *et al.* (1969), Kaczmarek (1970), Andrzejewski *et al.* (1993) oraz Choroszy (2000), a także Skoczyński (2001). Prezentowane przez nich wiadomości mają charakter dość uniwersalny i określają przede wszystkim zależności teoretyczne, które przekładane są także na bardzo praktyczne, użyteczne informacje. Kolman *et al.* (1969), Kaczmarek (1970) oraz Choroszy (2000) przedstawiają również wiele cennych rad i wskazówek, dotyczących sposobów poprawy dokładności obróbki, w odniesieniu do poszczególnych, omawianych przez nich przyczyn błędów. Jednakże informacje te okazują się w pewnych przypadkach zbyt ogólne, a w efekcie niewystarczające, ponieważ określają z reguły *potencjalne* przyczyny (grupy przyczyn), ale nie wskazują w jaki sposób zidentyfikować wśród nich w sposób jednoznaczny *prawdziwą* przyczynę (lub przyczyny) powstałej niedokładności obróbki. Pełne skorzystanie z tych wiadomości wymaga posiadania szerokiego zakresu specjalistycznej wiedzy (która w literaturze jest bardzo rozproszona), popartej praktycznym doświadczeniem. Autorzy niejednokrotnie podkreślają, że podstawą właściwie opracowanego i prawidłowo działającego procesu technologicznego, osiągającego odpowiedni poziom jakości, jest technolog o odpowiedniej (szerokiej) wiedzy, doświadczeniu i kwalifikacjach, na którym spoczywa odpowiedzialność za prawidłowe funkcjonowanie procesu (np. Feld, 2000, s.25; Choroszy, 2000, s.10, s. 62; Szatkowski, 2008, s.102). W rzeczywistości jednak takie połączenie odpowiedniej wiedzy, umiejętności i doświadczenia w jednej osobie nie występuje tak często, jak byłoby to potrzebne.

W ramach rozważań teoretycznych, w wielu źródłach (np. Kolman *et al.*, 1969; Kaczmarek, 1970, Andrzejewski *et al.*, 1993) podawane są wzory matematyczne i wykresy, odzwierciedlające niektóre z podstawowych zależności zachodzących pomiędzy różnymi czynnikami związanymi z procesem obróbki a wynikającymi z nich błędami obróbki. Skorzystanie z takich wzorów i modeli pozwala, na podstawie znanych wartości odpowiednich czynników, oszacować wartość niektórych składowych całkowitego błędu obróbki wyrobu (np. obliczenie wartości błędu stożkowości otworu na podstawie wartości ugięcia wiertła – Kolman *et al.*, 1969, s.136), lub też ocenić wartość czynników, które bezpośrednio wpływają na te błędy (np. wydłużenie cieplne noża tokarskiego w zależności od jego wymiarów, wytrzymałości materiału obrabianego, posuwu, głębokości i prędkości skrawania – Andrzejewski *et al.*, 1993, s.606). Należy przy tym pamiętać, że wyniki takich obliczeń, jako bazujące na zależnościach teoretycznych, są jedynie wartościami

szacunkowymi i pozwalają ocenić przybliżony wpływ poszczególnych czynników na błędy obróbki. Ponadto, niektóre ze wzorów wymagają znajomości wartości takich czynników, których wartość może być poznana jedynie w wyniku skomplikowanych pomiarów.

Jednym z działań prowadzonych w celu zapewnienia odpowiedniej dokładności obróbki jest także sprawdzanie czy wartości błędów poszczególnych elementów układu OUPN – szczególnie obrabiarek – mieszczą się w pewnych ustalonych dopuszczalnych granicach. Poznanie rzeczywistych wartości błędów układu OUPN wpływających na powstawanie błędów obróbki, możliwe jest w wyniku dokonania pomiaru odpowiednich własności układu. Metody badania własności obrabiarek (stosowane głównie na potrzeby tzw. badań odbiorczych), takich jak dokładność geometryczna, czy własności statyczne i dynamiczne, są omawiane w literaturze (np. Andrzejewski *et al.*, 1993). Zakres tych badań jest częściowo objęty normami, np. norma PN-ISO 230-1:1998 (Polski Komitet Normalizacyjny, 1998) dotyczy badania dokładności geometrycznej obrabiarek pracujących bez obciążenia lub w warunkach obróbki wykańczającej, norma PN-ISO 230-2:1999 (Polski Komitet Normalizacyjny, 1999a) – wyznaczania dokładności i powtarzalności pozycjonowania osi sterowanych numerycznie, a norma PN-ISO 230-4:1999 (Polski Komitet Normalizacyjny, 1999b) – badania okrągłości w obrabiarkach sterowanych numerycznie. Szeroki przegląd metod badania własności obrabiarek prezentuje Skoczyński (2001). Proponuje on także własną metodę oceny własności obrabiarek poprzez badanie dokładności obróbki przedmiotów próbnych, bazującą na ogólnych powiązaniach pomiędzy wybranymi rodzajami własności obrabiarki (statycznymi, geometrycznymi i dynamicznymi), a błędami wymiaru, kształtu i chropowatością przedmiotu obrobionego. Badanie własności obrabiarek pozwala sprawdzić ich ogólne własności i daje podstawy do stwierdzenia czy obrabiarka spełnia założone wymagania związane z dokładnością obróbki. Metody te nie dają jednak wprost szczegółowych odpowiedzi w przypadku, gdy poszukuje się przyczyny konkretnego powstającego błędu wyrobu. Jak pisze Skoczyński o swojej metodzie:

Negatywny wynik oceny własności obrabiarki wymaga podjęcia działań zmierzających do poprawy konstrukcji. Metoda oceny nie daje konkretnej odpowiedzi, który zespół maszyny będzie należało przekonstruować, ale przydatne może być wskazanie (za pomocą wprowadzonych wskaźników), że poprawa ma dotyczyć własności statycznych lub dynamicznych z geometrycznymi. Znalezienie słabego ogniwa układu OUPN jest możliwe na drodze doświadczałnej lub obliczeniowej (nie dotyczy to poszukiwania nadmiernych błędów geometrycznych). W przypadku metod obliczeniowych konieczne jest jednak dysponowanie zweryfikowanym eksperymentalnie modelem, którego budowa wymaga dużego doświadczenia. Metody eksperymentalne są z kolei znacznie prostsze, ale wykorzystywane środki badawcze wymagają dużych nakładów finansowych. (Skoczyński, 2001, s.136)

Ponadto, należy zauważyć, że metody badania własności obrabiarek wymagają zapewnienia odpowiednich warunków, z reguły są czasochłonne, często skomplikowane i wymagają specjalistycznego sprzętu pomiarowego, co nie pozostaje bez wpływu na koszty.

Podsumowując, należy zauważyć, że podejście polegające na wskazywaniu potencjalnych przyczyn błędów obróbki, w oparciu o wiedzę teoretyczną:

- ma charakter dość uniwersalny i pozwala określić zależności, które są prawdziwe dla wielu różnych rodzajów obrabiarek – zarówno sterowanych numerycznie, jak i tradycyjnych,
- jest źródłem szerokiego zasobu informacji, które mogą zostać wykorzystane przy szukaniu przyczyn błędów obróbki powstających w różnych procesach, przy różnych warunkach towarzyszących,

- prezentowane jest w literaturze z zakresu obróbki skrawaniem, obejmującej bardzo szeroki zakres czasowy, w wyniku analizy której stwierdzono, że – pomimo dynamicznego rozwoju tej technologii kształtowania – podstawowe zależności pomiędzy przyczynami powstających błędów i ich skutkami pozostają w zasadzie niezmiennie.

2.4.4. Redukcja zmienności w procesach obróbki skrawaniem – podsumowanie

Podsumowując, na podstawie analizy literatury z zakresu obróbki skrawaniem, stwierdzono że:

- Zmienność w procesach obróbki skrawaniem jest minimalizowana przede wszystkim poprzez kompensację błędów obróbki – w toku procesu (on-line) lub poza nim (off-line).
- Opracowywane zależności i modele służące do kompensacji błędów obróbki posiadają wiele ograniczeń, związanych m.in. z nie uwzględnianiem wszystkich czynników mogących wpływać na dokładność obróbki, a także ze specyficznymi cechami każdego rozpatrywanego procesu produkcyjnego.
- Zastosowanie proponowanych modeli i symulacji ogranicza się z reguły do kompensacji skutków zachodzących oddziaływań, a nie do szukania przyczyn powstających błędów obróbki.
- Z uwagi na fakt, że przyczyna powstającego błędu obróbki może leżeć w różnych obszarach i wynikać z wielu różnych oddziaływań, każdy przypadek powinien zostać indywidualnie rozpatrzony, a – aby zminimalizować prawdopodobieństwo pominięcia prawdziwej przyczyny błędu – zidentyfikowany zbiór potencjalnych czynników powinien być jak najszerszy.
- Do celu identyfikacji przyczyny (przyczyn) powstającego błędu obróbki najbardziej użyteczne wydaje się być podejście polegające na wskazywaniu potencjalnych przyczyn błędów obróbki, w oparciu o wiedzę teoretyczną, które jednak obejmuje bardzo szeroki zakres wiedzy, rozproszonej w literaturze;
- Prezentowane grupy potencjalnych przyczyn dla poszczególnych rodzajów błędów kształtowania są często bardzo liczne i nie uwzględniają ewentualnych interakcji pomiędzy kilkoma oddziałującymi jednocześnie czynnikami, co sprawia, że identyfikacja prawdziwej przyczyny (przyczyn) wymaga dokładnego zbadania sytuacji w każdym szczegółowym przypadku;
- Nie znaleziono w literaturze z zakresu technologii obróbki skrawaniem jednoznacznego algorytmu postępowania, jakie należałoby przeprowadzić w celu identyfikacji rzeczywistej przyczyny (przyczyn) powstającego błędu obróbki.

3. ZMIENNOŚĆ PROCESÓW I JEJ REDUKCJA – PODEJŚCIE WYWODZĄCE SIĘ Z OBSZARU ZARZĄDZANIA JAKOŚCIĄ †

3.1. Pojęcie zmienności procesu

Zmienność cechuje wszystkie procesy i jest ich nieodłącznym elementem. Jak piszą Juran i Gryna (1974): „zmienność oznacza, że nie może być dwóch rzeczy idealnie jednakowych, nawet wtedy, gdy dołożono usilnych starań, aby uczynić je identycznymi pod pewnym względem”. Zmienność charakteryzująca proces produkcyjny, wynikająca ze zmienności cechującej wejścia do tego procesu oraz wszystkie czynniki oddziałujące na dany proces, objawia się poprzez zmienność charakteryzującą produkt wyjściowy danego procesu. Zmienność ta jest jednym z kryteriów oceny prawidłowego działania procesu – zbyt duża zmienność będzie oznaczała, że proces nie spełnia stawianych przed nim wymagań, co będzie się uwidaczniało jako przekroczenie granic specyfikacji, a zatem produkowanie wyrobów niezgodnych z wymaganiami. Dlatego znajomość wielkości zmienności charakteryzującej procesy produkcyjne, oraz jej kontrolowanie, jest warunkiem utrzymywania jakości procesów i wyrobów na właściwym poziomie. Natomiast doskonalenie tej jakości możliwe jest poprzez redukcję zmienności kształtujących ją procesów.

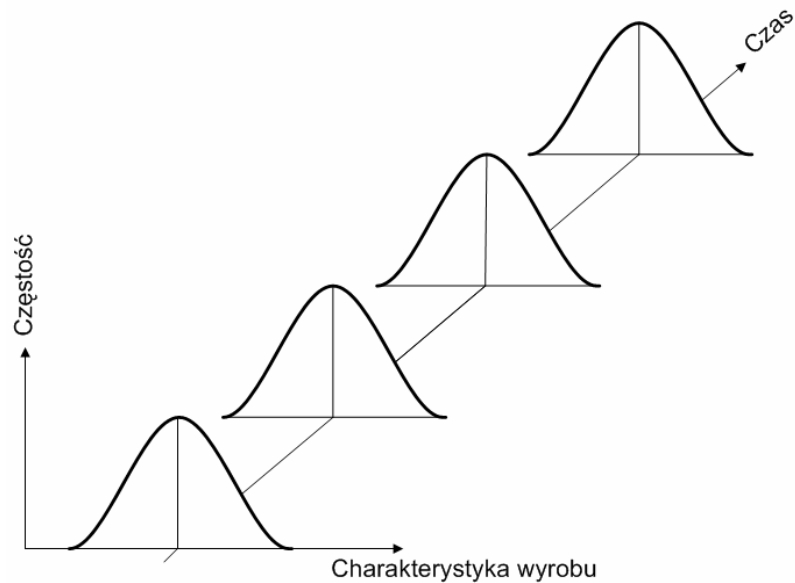
3.1.1. Zmienność z przyczyn losowych a zmienność z przyczyn specjalnych

Opisując zjawisko zmienności procesów, Walter A. Shewhart (1980) wyróżnił dwa typy zmienności, jakie mogą występować w każdym procesie. Podział wynika z założenia, że na proces mogą oddziaływać dwa rodzaje przyczyn wywołujących zmienność: przyczyny nazwane przez Shewharta wyznaczalnymi (ang. *assignable causes*) oraz przyczyny nazwane losowymi lub przypadkowymi (ang. *chance causes*). Shewhart (1980) stwierdził, że na każdy proces oddziałuje pewien system tzw. przyczyn losowych, który – jeśli na proces nie działają inne przyczyny – powoduje pewną zmienność procesu, która jest dla niego charakterystyczna i w pewnym zakresie przewidywalna. Natomiast oddziaływanie dodatkowo na proces tzw. przyczyn wyznaczalnych powoduje, że wynik takiego procesu jest praktycznie nieprzewidywalny. Rozróżnienie przyczyn zmienności zaproponowane przez Shewharta było następnie stosowane przez jego ucznia W. Edwardsa Deminga, a także przez innych prekursorów i współtwórców teorii Zarządzania Jakością, takich jak Juran (Juran i Gryna, 1974; DeFeo i Barnard, 2004), czy Feigenbaum (1991). Do rozpowszechnienia tej idei najbardziej przyczynił się Deming (1994), który stosował nazwy: przyczyny specjalne (ang. *special causes*) i przyczyny losowe (ang. *common causes*). Koncepcja i terminologia zaproponowana przez Shewharta i Deminga (specjalne/wyznaczalne oraz losowe przyczyny zmienności) była i jest do tej pory stosowana przez wielu ich następców.

Zgodnie z tym, co pisał Shewhart (1980, s.7), losowe przyczyny zmienności (ang. *chance causes*) są nieznanne, a skutki oddziałujących w naturze systemów przyczyn losowych mogą być przewidziane (Shewhart, 1980, s.130) – dlatego o procesie będącym pod działaniem stałego systemu przyczyn losowych mówi się, że jest on w stanie statystycznej kontroli (Shewhart, 1980, s.146) lub w stanie statystycznie uregulowanym (Polski Komitet Normalizacyjny, 1994, s.17). Deming (1994, s.314) scharakteryzował przyczyny losowe jako przyczyny należące do istniejącego systemu i dodał, że proces będący pod ich działaniem jest procesem stabilnym, przez co jego zachowanie w bliskiej przyszłości jest przewidywalne, a zdolność możliwa do określenia (Deming, 1994, s.321). Koncepcję zmienności procesu

† Główne wątki zawarte w tym rozdziale pracy przedstawiono w: Koch i Olejnik, 2009

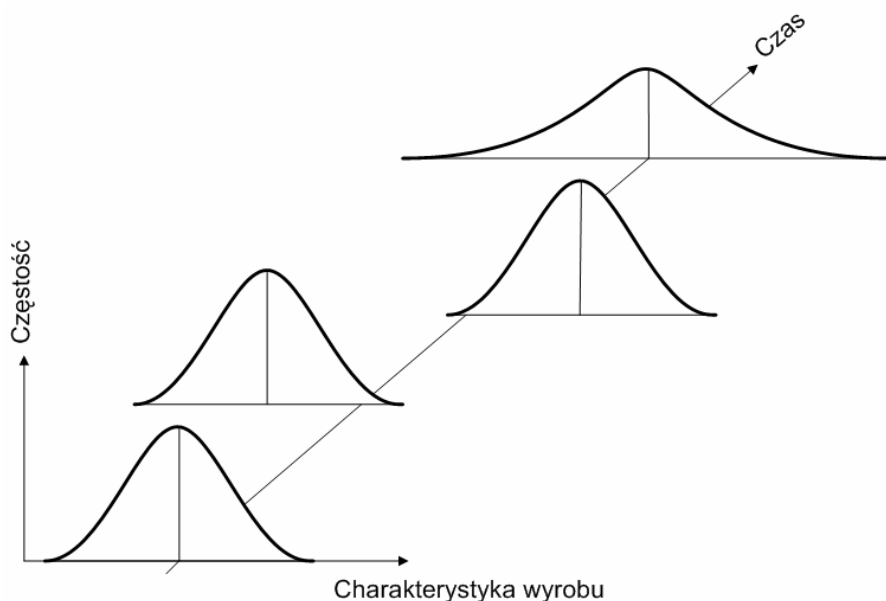
wynikającej z przyczyn losowych, powodującej jego stabilność w czasie, przedstawiono w sposób uproszczony na Rysunku 3.1.



Rys.3.1. Koncepcja zmienności procesu z przyczyn losowych

Źródło: na podstawie Wheeler i Chambers, 1992, s.5

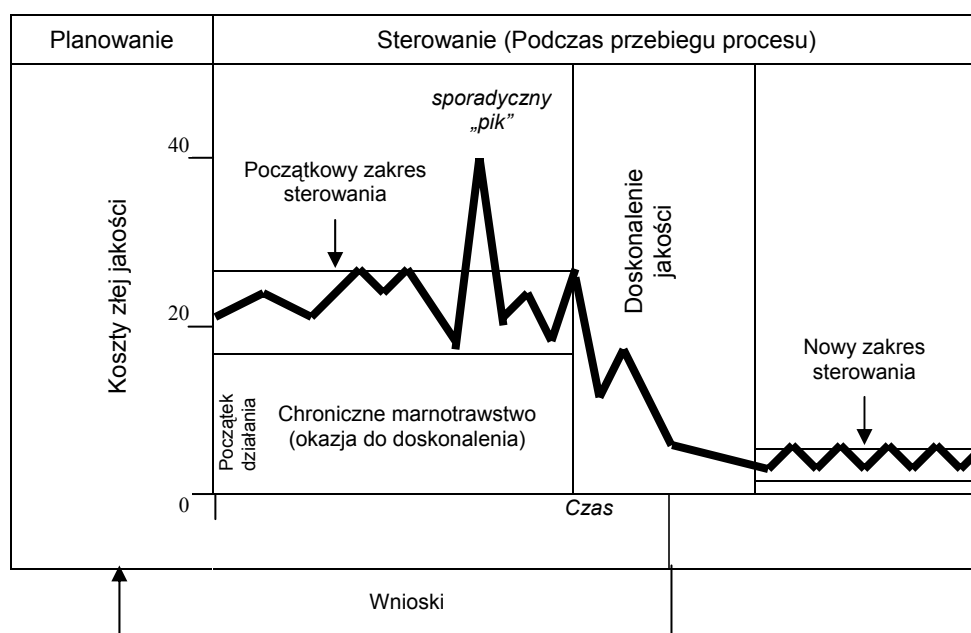
Jeżeli na proces dodatkowo, oprócz właściwych mu przyczyn losowych, oddziałują przyczyny nie należące do stałego systemu, są one przez Shewharta (1980, s.14) nazywane wyznaczalnymi przyczynami zmienności (ang. *assignable causes*). Deming (1994) zamiast określenia „przyczyny wyznaczalne” stosował nazwę „przyczyny specjalne” (ang. *special causes*) i podkreślał, że ich oddziaływanie powoduje, że proces nie znajduje się w stanie tzw. statystycznej kontroli, a więc jest nieprzewidywalny. Na Rysunku 3.2 przedstawiono, w sposób uproszczony, koncepcję niestabilności procesu w czasie, spowodowanej działaniem specjalnych przyczyn zmienności.



Rys.3.2. Koncepcja zmienności procesu z przyczyn specjalnych

Źródło: na podstawie Wheeler i Chambers, 1992, s.5

Z kolei Juran zaproponował nieco inne podejście do tych dwóch głównych rodzajów zmienności. Wprowadził on pojęcie tzw. wad (lub problemów) chronicznych – utrzymujących się przez dłuższy czas, oraz wad (problemów) sporadycznych – nagłych niekorzystnych zmian istniejącego stanu (Juran i Gryna, 1974, s.30). Zatem opisywane przez Jurana wady chroniczne uznawane są za typowy skutek oddziaływania losowych przyczyn zmienności – będących częścią istniejącego systemu, a wady sporadyczne – za rezultat działania specjalnych przyczyn zmienności, nie należących do stałego systemu (DeFeo i Barnard, 2004, s.110-111). Juran (DeFeo i Barnard, 2004, s.30) odniósł dwa wyróżnione przez siebie rodzaje wad do tzw. kosztów złej jakości (ang. *Costs Of Poor Quality*, COPQ; a później – tzw. kosztów źle działających procesów: ang. *Costs Of Poorly Performing Processes*, COP³), ukazując zarazem trzy podstawowe zadania w odniesieniu do jakości: Planowanie, Sterowanie i Doskonalenie (nazywane również Przełomem). Ideę problemów sporadycznych i chronicznych na tle Trylogii Jurana przedstawiono na Rysunku 3.3.



Rys.3.3. Trylogia Jurana

Źródło: na podstawie: Juran i Godfrey, 1999, s.2.7; DeFeo i Barnard, 2004, s.30

Współcześnie, pochodząca od Shewharta i Deminga koncepcja podziału przyczyn całkowitej zmienności procesu na przyczyny losowe (nazywane też przypadkowymi, naturalnymi, ogólnymi, inherentnymi, lub systemowymi) i specjalne (nazywane też wyznaczalnymi) jest wciąż stosowana i propagowana w teorii i praktyce Zarządzania Jakością, a waga tej koncepcji jest wciąż podkreślana (Nolan i Provost, 1990; Wheeler i Chambers, 1992; Rohleder i Silver, 1997; Woodall, 2000; Liberatore, 2001; Thompson *et al.*, 2005; Polski Komitet Normalizacyjny, 2005; Hamrol, 2007; Wheeler, 2008). Zestawienie najczęściej stosowanego nazewnictwa oraz głównych cech dwóch podstawowych rodzajów zmienności przedstawiono w Tabeli 3.1.

Tabela 3.1. Zestawienie stosowanego nazewnictwa i charakterystyka dwóch podstawowych rodzajów zmienności

	Zmienność z przyczyn specjalnych	Zmienność z przyczyn losowych	Źródło
Nazewnictwo zaproponowane przez klasyków	Zmienność z przyczyn wyznaczalnych (ang. <i>assignable causes</i>)	Zmienność z przyczyn przypadkowych / losowych (ang. <i>chance causes</i>)	(Shewhart, 1980)
	Zmienność z przyczyn specjalnych (ang. <i>special causes</i>)	Zmienność z przyczyn losowych (ang. <i>common causes</i>)	(Deming, 1994)
Inne stosowane nazewnictwo	Zmienność z przyczyn specjalnych (ang. <i>special causes</i>)	Zmienność z przyczyn inherentnych, losowych, systemowych (ang. <i>inherent, common, systemic causes</i>)	(Rohleder i Silver, 1997)
	Zmienność z przyczyn specjalnych (wyznaczalnych)	Zmienność z przyczyn ogólnych	(Thompson <i>et al.</i> , 2005)
	Zmienność z przyczyn specjalnych lub wyznaczalnych	Zmienność z przyczyn losowych, naturalnych lub inherentnych	(Hamrol, 2007)
	Zmienność spowodowana przyczynami wyznaczalnymi [§]	Zmienność własna procesu, spowodowana przyczynami losowymi	(Polski Komitet Normalizacyjny, 1994)
	Całkowita zmienność procesu		
		Sygnał (ang. <i>signal</i>)	Szum (ang. <i>noise</i>)
Charakterystyka	Proces pod działaniem obu rodzajów przyczyn zmienności – niestabilny, nieprzewidywalny, o niewyznaczalnej zmienności.	Proces pod działaniem wyłącznie losowych przyczyn zmienności – stabilny, przewidywalny, o wyznaczalnej zdolności.	(Shewhart, 1980) i (Deming, 1994)
Skutki	Wady/problemy sporadyczne (ang. <i>sporadic problems</i>)	Wady/problemy chroniczne (ang. <i>chronic problems</i>)	(Juran i Gryna, 1974), (DeFeo i Barnard, 2004)
	Problemy okazjonalne (ang. <i>occasional problems</i>)	Problemy chroniczne (ang. <i>chronic problems</i>)	(Rohleder i Silver, 1997)

Źródło: opracowanie własne

[§] W normie PN-ISO 3534-2:1994 wyróżniona jest także tzw. zmienność systematyczna – definiowana jako odchylenia nielosowe zachodzące w procesie stabilnym, np. w regularnych odstępach (Polski Komitet Normalizacyjny, 1994, s.18) – której przyczyny zalicza się do grupy przyczyn wyznaczalnych.

3.1.2. Postępowanie ze zmiennością z przyczyn specjalnych a postępowanie ze zmiennością z przyczyn losowych

Identyfikacja typu zmienności, jaki charakteryzuje dany proces, jest bardzo istotna, przede wszystkim dlatego, że jest ona warunkiem właściwego wyboru odpowiedniego podejścia do zarządzania jakością tego procesu. Ponieważ proces będący pod wpływem przyczyn specjalnych zmienności wymaga zupełnie innego postępowania niż ten, który znajduje się wyłącznie pod wpływem przyczyn losowych, dlatego kluczową sprawą jest umiejętność rozróżnienia tzw. naturalnej zmienności procesu (wynikającej wyłącznie z przyczyn losowych) od stanu, w którym na proces oddziałują również przyczyny specjalne. Jak stwierdził sam Deming (1994, s.309), „głównym problemem w zarządzaniu i przywództwie (...) jest niezrozumienie informacji zawartych w zmienności”.

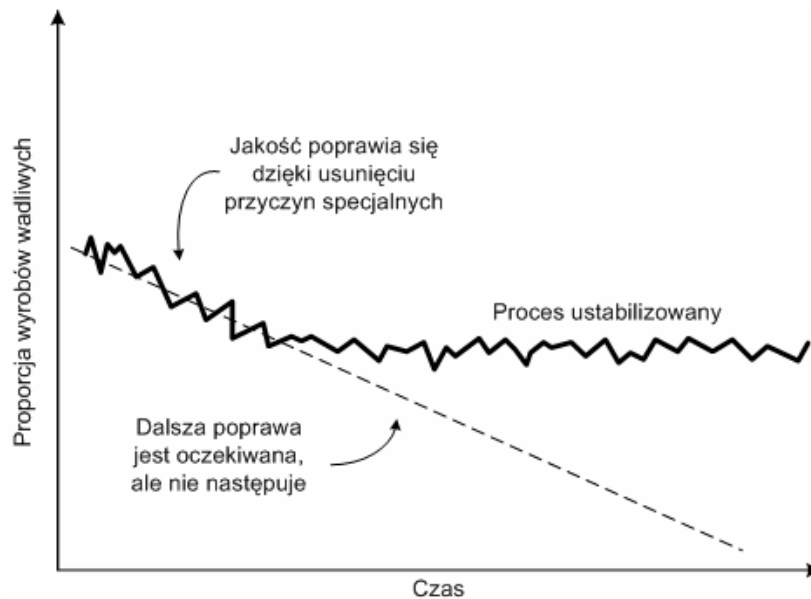
Podział zmienności na dwa główne typy i ich rozróżnienie leży u podstaw teorii Statystycznego Sterowania Procesami (ang. *Statistical Process Control, SPC*), a głównym narzędziem polecanym do dokonania takiego rozróżnienia są karty kontrolne (ang. *Control Charts*), które pozwalają odróżnić naturalną zmienność właściwą dla danego procesu od zmienności spowodowanych przyczynami specjalnymi. Zarówno Shewhart (1980) i Deming (1994) – prekursorzy tego zagadnienia, jak i wielu ich następców (Nolan i Provost, 1990; Feigenbaum, 1991; Wheeler i Chambers, 1992; Thompson i Koronacki, 1994; Neave i Wheeler, 1996; Rohleder i Silver, 1997; Neave, 1997; Woodall, 2000; Bertels, 2003; Snee i Hoerl, 2003; Polski Komitet Normalizacyjny, 2005) podkreślają wysoką użyteczność kart kontrolnych (nazywanych również kartami „zachowania się” procesu – ang. *Process Behavior Charts* (Wheeler, 1999; Practical Process Improvement, 2008)), a także wykresów przebiegu procesu (ang. *Run Charts*), we wstępnej analizie i charakterystyce zmienności procesu, jako narzędzia dającego użytkownikowi wskazówkę co do podjęcia odpowiedniego działania. Wheeler i Chambers (1992, s.188) podkreślają, że kluczem do skutecznego stosowania metod statystycznych (takich jak m.in. karty kontrolne) do doskonalenia procesów jest odpowiedni sposób myślenia, a Snee i Hoerl (2003, s.10) zauważają, że „statystyka to jedyna nauka zorientowana na identyfikację, pomiar i zrozumienie zmienności”, a przez to umożliwiająca jej redukcję. Ten wątek podejmuje Britz *et al.* (2000) przytaczając definicję Myślenia Statystycznego (ang. *Statistical Thinking*), która została zawarta w wydanej przez Quality Press w 1996 roku publikacji: „Glossary and Tables for Statistical Quality Press”. Definicja ta brzmi: “Myślenie Statystyczne to filozofia uczenia się i działania w oparciu o następujące fundamentalne zasady:

- każda praca ma miejsce w systemie połączonych procesów,
- zmienność istnieje we wszystkich procesach, oraz
- zrozumienie i redukcja zmienności są kluczem do sukcesu” (Britz *et al.*, 2000, s.14).

Koncepcja Myślenia Statystycznego wiąże się z inną koncepcją, mającą zastosowanie w ramach działań związanych z doskonaleniem jakości procesów, jaką jest tzw. Myślenie Systemowe. Myślenie Systemowe – definiowane przez Senge’go (Senge, 1994, s.68-69) jako umiejętność „widzenia całości”, dostrzegania związków – jest uważane za jedną z najważniejszych umiejętności dobrego inżyniera (Frank, 2002). Natomiast Myślenie Systemowe w połączeniu z tzw. Myśleniem Procesowym (polegającym na postrzeganiu i zarządzaniu działaniami i związanymi z nimi zasobami jako procesem) jest uważane za jeden z podstawowych elementów niezbędnych do skutecznego przeprowadzenia procesu doskonalenia (DeFeo i Barnard, 2004, s.148). Ponadto, zarówno podejście procesowe, jak i podejście systemowe wchodzi w skład podstawowych zasad zarządzania jakością (Polski Komitet Normalizacyjny, 2006, s.7-9).

Deming (1994, s.315) nazywa problemy wynikające ze zmienności naturalnej procesu błędami „z winy systemu” i podkreśla, że częstym błędem jest zakładanie, że wina za każdy pojawiający się w procesie defekt, błąd czy wypadek może być komuś przypisana lub jest związana z jakimś specjalnym zdarzeniem. Proces będący wyłącznie pod działaniem przyczyn losowych wykazuje charakterystyczną dla siebie naturalną zmienność i daje najlepsze wyniki, jakie może dać w aktualnym stanie. Według doświadczenia Deminga, większość problemów, a co za tym idzie większość możliwości doskonalenia, ma następujące proporcje: 94% należy do systemu, a jedynie 6% wynika z przyczyn specjalnych. Cytując Jurana, Deming (1994, s.338) stwierdza, że „usunięcie specjalnej przyczyny zmienności, aby przejść w kierunku stanu statystycznej kontroli, jakkolwiek ważne, nie jest doskonaleniem procesu. Usunięcie przyczyny specjalnej jedynie sprowadza system z powrotem tam, gdzie powinien być”. Dlatego pierwszym krokiem w działaniach związanych z zarządzaniem jakością każdego procesu powinna być identyfikacja i eliminacja specjalnych przyczyn zmienności, w celu ustabilizowania procesu i umożliwienia poznania jego naturalnej zmienności. Działania takie polegają na analizie każdego odchylenia procesu wykraczającego poza granice jego naturalnej zmienności w celu identyfikacji przyczyny (specjalnej), która je wywołała.

Jak podkreśla Deming (1994, s.321), samo usunięcie specjalnych przyczyn zmienności nie zawsze wystarczy, aby proces mógł być uważany za „dobry”. Sprowadzenie procesu do stanu statystycznej kontroli oznacza, że funkcjonuje on najlepiej, jak jest to możliwe w obecnej sytuacji (systemie), ale jeśli naturalna zmienność procesu przekracza wymagania stawiane przed procesem, to mimo stabilności będzie on produkował braki. W tej sytuacji należy jednak powstrzymać się od prób identyfikacji przyczyn każdego odchylenia procesu od zadanej wartości, które zawiera się w ramach jego naturalnej zmienności, albowiem jej przyczyny są inherentną częścią procesu (systemu). Zatem, aby zredukować zmienność procesu wynikającą z przyczyn losowych konieczne jest wprowadzenie zmiany w istniejącym procesie (systemie). Deming podkreśla negatywne skutki nie rozróżniania zmienności wynikającej z przyczyn losowych od zmienności wynikającej z przyczyn specjalnych. Przede wszystkim zalicza do nich podejmowanie nieodpowiednich działań i próby postępowania z procesem statystycznie stabilnym jakby był on pod wpływem przyczyn specjalnych. Takie próby identyfikacji konkretnej przyczyny każdego odchylenia w procesie i korygowania stabilnego procesu, aby skompensować niepożądany wynik (który jednak mieści się w granicach naturalnej zmienności danego procesu) – jak udowadnia Deming (1994, s.327) – doprowadzą jedynie do uzyskania wyniku gorszego niż gdyby proces pozostawiono bez zmian. Takie zjawisko Deming nazywa przeregulowaniem procesu. Drugą ważną konsekwencją nie zdawania sobie sprawy z istnienia dwóch rodzajów zmienności procesu i dwóch różnych sposobów postępowania właściwych dla każdego z nich, jest według Deminga (1994, s.323) stan rosnącej frustracji, która pojawia się w sytuacji, gdy po pierwszej zdecydowanej poprawie jakości uzyskanej w wyniku wyeliminowania przyczyn specjalnych następuje stagnacja związana z większą trudnością działań koniecznych do redukcji naturalnej zmienności procesu (wynikającej z przyczyn losowych). Jak niejednokrotnie podkreśla się w literaturze (np. DeFeo i Barnard, 2004, s.120-121; Nolan i Provost, 1990, s.78), identyfikacja losowych przyczyn zmienności jest zdecydowanie trudniejsza od identyfikacji przyczyn specjalnych, przez co wymaga bardziej skomplikowanych metod i głębszego zrozumienia procesu, a także przewodnictwa ze strony kierownictwa organizacji. Wynikającą z takiego stanu rzeczy, typową ścieżkę frustracji opisaną przez Deminga przedstawiono na Rysunku 3.4.



Rys.3.4. Typowa ścieżka frustracji, wynikająca z niezrozumienia natury zmienności procesu
 Źródło: na podstawie Deming, 1994, s.323

Fakt, że każdy z dwóch podstawowych typów zmienności wymaga innego rodzaju działań, jest uznawany za wciąż nie dość powszechnie znany. Wielu praktyków Zarządzania Jakością zauważa, że wiedza ta jest nie dość powszechna i wciąż na nowo podkreśla jej znaczenie (Deming, 1994; Nolan i Provost, 1990; Wheeler i Chambers, 1992; Rohleder i Silver, 1997; Gupta, 2006). W celu podkreślenia tej różnicy, podejście obejmujące działania podejmowane w kierunku rozpoznania i redukcji zmienności procesu pochodzącej od przyczyn specjalnych nazywane jest często Rozwiązywaniem problemów (ang. *Problem Solving*), natomiast sposób postępowania pozwalający na redukcję zmienności naturalnej procesu nazywa się Doskonaleniem procesu (ang. *Process Improvement*) lub też Ciągłym doskonaleniem (ang. *Continuous Improvement* lub *Continual Improvement*). Takie rozróżnienie stosują m.in. Britz *et al.* (2000), lecz – choć uzasadnione i użyteczne – nie jest ono powszechne i można zauważyć częste zamienne używanie wyżej wymienionych określeń (np. Bertels, 2003; Hamrol, 2007; Hsieh *et al.*, 2007), co może dodatkowo utrudniać zrozumienie prawdziwego sensu działań związanych z zarządzaniem jakością procesów i redukcją ich zmienności.

Całościowe spojrzenie na omówione wyżej zagadnienia związane z zarządzaniem jakością procesu przedstawił Juran (Juran i Gryna, 1974; Juran i Godfrey, 1999; DeFeo i Barnard, 2004), który w ramach zaproponowanego przez siebie podejścia wyróżnił trzy główne elementy (tzw. Trylogia Jurana – patrz Rys.3.3). Pierwszym z nich jest Planowanie Jakości, które powinno być wstępnym etapem realizowanym jeszcze przed uruchomieniem procesu. Podczas przebiegu procesu powinno mieć miejsce Sterowanie Jakością, w ramach którego rozwiązywane są tzw. problemy sporadyczne (będące wynikiem działania przyczyn specjalnych). Ich rozwiązanie wymaga identyfikacji przyczyn specjalnych i ich wyeliminowania, co spowoduje, że proces ze stanu niestabilnego przejdzie w stan statystycznie ustabilizowany. Takie działania, jak pisze Juran (Juran i Godfrey, 1999, s.2.6; DeFeo i Barnard, 2004, s.120-121) nazywane są często „działaniami korygującymi”, „rozwiązywaniem problemów”, czy też „gaszeniem pożarów”. Dopiero w takiej przewidywalnej i kontrolowanej sytuacji można uznać, że mamy do czynienia z procesem w jego naturalnym stanie. Wtedy dopiero, jeśli okaże się to konieczne, w szczególności wtedy,

gdy naturalna zmienność procesu przekracza dopuszczalne granice (granice specyfikacji), można przejść do etapu Doskonalenia Jakości, poprzez redukcję naturalnej zmienności procesu, wynikającej z oddziaływania przyczyn losowych. Tak zdefiniowane doskonalenie procesu jest uznawane za zadanie zdecydowanie trudniejsze niż rozwiązywanie problemów sporadycznych (Juran i Gryna, 1974, s.30; DeFeo i Barnard, 2004, s.120-121). Sytuację mającą miejsce gdy proces jest w stanie statystycznie stabilnym Juran nazywa sytuacją, w której proces generuje tzw. problemy chroniczne. Rozwiązanie problemów chronicznych wymaga działań, które są trudniejsze od tych, jakie podejmuje się w celu likwidacji problemów sporadycznych, ponieważ problemy chroniczne są nieodłączną częścią aktualnego stanu procesu. Ich rozwiązanie wymaga fundamentalnych zmian w aktualnym przebiegu procesu generującego tego rodzaju problemy, a więc takiego, którego naturalna zmienność przekracza wymagane specyfikacje. Dlatego też Juran nazywa taki proces doskonalenia jakości „przełomowym doskonaleniem” (ang. *Breakthrough Improvement*), a cała metoda postępowania ze zmiennością procesu według Jurana przebiega w następujący sposób: w pierwszej kolejności prowadzone powinno być rozwiązywanie problemów sporadycznych (jeśli występują) powodowanych przyczynami specjalnymi, a następnie doskonalenie procesu poprzez redukcję jego naturalnej zmienności, wywoływanej przyczynami losowymi. Juran i Gryna (1974, s.52) obrazowo przedstawiają rozróżnienie dwóch kategorii celów w ramach zarządzania jakością procesów: cele związane z redukcją zmienności wynikającej z przyczyn specjalnych osiągnięte są drogą zapobiegania zmianom – a więc utrzymywania stabilności procesów, natomiast cele związane z redukcją zmienności pochodzącej od przyczyn losowych osiągnięte są poprzez wprowadzanie zmian – tzw. przełomowych udoskonaleń w aktualnym stanie procesu.

Zestawienie omówionych cech charakteryzujących postępowanie z dwoma podstawowymi rodzajami zmienności zawarto w Tabeli 3.2.

Tabela 3.2. Porównanie cech charakteryzujących postępowanie z dwoma podstawowymi rodzajami zmienności

	Zmienność z przyczyn specjalnych	Zmienność z przyczyn losowych
Podejście	Sterowanie jakością procesu (Rozwiązywanie problemów)	Doskonalenie jakości procesu (Doskonalenie procesu / Ciągłe doskonalenie)
Cel	Zapewnienie stabilności procesu (Zapobieganie niekorzystnym zmianom)	Podniesienie stabilnego procesu na nowy poziom (Wprowadzanie korzystnych zmian)
Podejmowane działanie	Monitoring procesu i natychmiastowe działania naprawcze (działania lokalne)	Projekty doskonalące w ramach długoterminowej strategii (działania systemowe)
Sposób postępowania	Szukanie i usuwanie przyczyn poszczególnych odchyłeń w procesie (wykraczających poza jego naturalną zmienność)	Analiza wszystkich danych w celu zrozumienia procesu i wprowadzenia przełomowych zmian
Stopień trudności	Niski	Wysoki
Odpowiedzialność	Pracownicy bezpośrednio związani z procesem oraz kierownictwo	Kierownictwo

Źródło: opracowanie własne

W związku z tym, że każdy z dwóch podstawowych rodzajów zmienności wymaga innego postępowania, wskazuje się także na potrzebę angażowania odpowiednich ludzi do realizacji każdego z dwóch podejmowanych rodzajów działań (Deming, 1994, s.320-322; Nolan i Provost, 1990, s.77-78). Podczas gdy identyfikacją i usuwaniem przyczyn specjalnych zmienności procesu – z uwagi na typowo lokalny charakter tych działań – powinni zajmować się przede wszystkim pracownicy bezpośrednio związani z danym procesem (pod nadzorem przełożonych), to nie powinni oni być odpowiedzialni za działania związane z redukcją zmienności naturalnej procesu. Działania takie, jako z reguły trudniejsze i wymagające wyższego poziomu zrozumienia procesu oraz zastosowania bardziej skomplikowanych narzędzi analizy i doskonalenia, a także obejmujące większy obszar organizacji, powinny być prowadzone pod przewodnictwem kierownictwa, przy znaczącym wsparciu wiedzy dostarczanej przez ekspertów.

3.1.3. Różne podejścia do redukcji zmienności naturalnej procesów

Należy zauważyć, że podczas gdy działania podejmowane w celu minimalizacji zmienności procesu wynikającej z przyczyn specjalnych przedstawiane są w literaturze jako stosunkowo łatwe i nieskomplikowane, to działaniom mającym na celu redukcję zmienności naturalnej procesu (wynikającej z przyczyn losowych) poświęca się zdecydowanie mniej uwagi i opisuje je w sposób bardziej ogólny. Być może wiąże się to z początkami koncepcji rozróżniania tych dwóch typów zmienności i zaproponowaną przez Shewharta (1980) nazwą „przyczyny wyznaczalne”, która zdaje się sugerować, że „przyczyny losowe” nie są możliwe do „wyznaczenia”, a zatem nie jest możliwe poznanie przyczyn zmienności naturalnej procesu – co wskazywałoby, że w takim wypadku redukcja tej zmienności jest niezwykle trudna, lub wręcz niemożliwa. Sam Shewhart (1980, s.25) uważał, że do redukcji zmienności naturalnej procesu konieczna jest zmiana samego procesu. Można odnieść wrażenie, że dla niektórych autorów pojęcie „fundamentalna zmiana” stało się synonimem wszelkich działań, jakie powinny zostać podjęte w celu redukcji zmienności naturalnej procesu, zastępując jednocześnie jakiegokolwiek głębsze wyjaśnienie, w jaki sposób zidentyfikować i przeprowadzić taką zmianę (np. Wheeler, 1999; Wheeler, 2008). Rohleder i Silver (1997) używają w takiej sytuacji pojęcia „innowacja procesu” i jako możliwe sposoby prowadzące do jej dokonania proponują prowadzenie eksperymentów, modelowanie, symulacje, a także ogólne pojęcie Reengineeringu procesu, choć jednocześnie sami przyznają, że jest to podejście, za pomocą którego w takiej sytuacji „trudno jest osiągnąć prawdziwy i całkowity sukces” (Rohleder i Silver, 1997, s.150). Podobnie jak inni autorzy (np. Feigenbaum, 1991, s.282-283; Nolan i Provost, 1990; Britz *et al.*, 2000, s.98), Rohleder i Silver (1997, s.150) podkreślają, że identyfikacja zmian, które poprawią w sposób fundamentalny działanie procesu (wynikające z jego naturalnej zmienności) jest zadaniem trudnym i wymaga dogłębnego zrozumienia istniejącego procesu. Autorzy reprezentujący pogląd mówiący o niemożliwości poznania przyczyn naturalnej zmienności procesu i zalecający „fundamentalną zmianę”, nie proponują jednak żadnych praktycznych wytycznych, które pozwoliłyby przeprowadzić konkretne działania w celu odpowiedniego poznania procesu oraz identyfikacji i wprowadzenia owej zmiany.

Inne podejście wydają się prezentować autorzy tacy jak m.in. Deming czy Juran. Piszą oni wyraźnie o możliwości identyfikacji i usuwania przyczyn zmienności naturalnej procesu (Deming, 1994, s.321-322; Juran i Gryna, 1974, s.124-125; Feigenbaum, 1991, s.283; Nolan i Provost, 1990, s.78; Scherkenbach, 1991, s.190; Britz *et al.*, 2000, s.88-89), w odróżnieniu od podejścia przedstawionego powyżej, zakładającego że jest to niemożliwe. Jedną z koncepcji proponowanych przez tych autorów jest koncepcja tzw. czynnika dominującego (jednego lub kilku), który wywiera największy wpływ na zmienność naturalną badanego

procesu (Juran i Gryna, 1974, s.513; Feigenbaum, 1991, s.283; Snee i Hoerl, 2003, s.12; Steiner i MacKay, 2005, s.16; Steiner *et al.*, 2008, s.8). Koncepcja ta, opierająca się na zasadzie Pareto, polega na założeniu, że pomimo oddziaływania na proces wielu przyczyn zmienności, tylko jedna lub kilka z nich wywiera dominujący wpływ na wynikową zmienność procesu. W procesie poszukiwania czynnika dominującego stosuje się metodę podziału wszystkich potencjalnych czynników wpływających na zmienność na grupy nazywane rodzinami zmienności (Steiner i MacKay, 2005; Steiner *et al.*, 2008). Do czynników branych pod uwagę w tym podejściu zalicza się takie źródła różnic pomiędzy produkowanymi wyrobami, jak np. wykonywanie jednego rodzaju wyrobów na różnych maszynach, czy też podczas różnych zmian produkcyjnych. Juran i Gryna (1974, s.513) do najczęściej spotykanych czynników dominujących zaliczają: nastawienie procesu, maszynę, operatora oraz materiał wejściowy.

Koncepcja czynnika dominującego, możliwego do zidentyfikowania w procesie wykazującym wyłącznie zmienność naturalną, wydaje się być sprzeczna z proponowaną przez Shewharta ideą wyznaczalnych i losowych przyczyn zmienności. Shewhart wyraźnie oddzielił przyczyny „wyznaczalne” (możliwe do wyznaczenia, identyfikacji) od przyczyn losowych. Jednakże w ramach przyczyn wyznaczalnych wyróżnił on dwa szczególne rodzaje przyczyn (Shewhart, 1980, s.146 i s.321):

- Typ I – trendy, cykle, sezonowość, a także różnice pomiędzy maszynami czy źródłami materiału wejściowego,
- Typ II – dominująca przyczyna lub grupa przyczyn, *będąca częścią stałego systemu*.

Można dostrzec tu pewną niekonsekwencję, albowiem definiując wyznaczalne przyczyny zmienności Shewhart (1980, s.14) określił je jako *nie należące do stałego systemu*.

Z tych powodów, bardziej właściwą i w pełni oddającą prawdziwe znaczenie, wydaje się być terminologia zaproponowana przez Deminga: przyczyny losowe (będące częścią systemu) i specjalne (nie będące częścią systemu), która nie rezerwuje terminu „wyznaczalne” dla żadnej z tych grup, przez co dopuszcza możliwość identyfikacji zarówno specjalnych, jak i losowych przyczyn zmienności. Taka terminologia jest zgodna z prezentowanym przez Deminga przekonaniem o możliwości identyfikacji przyczyn zmienności naturalnej procesu.

Niektórzy autorzy, uznając podział na losowe i wyznaczalne przyczyny zmienności procesów za niewystarczający, wyróżniają dodatkowe kategorie. Na przykład Hare (2001), stosując pojęcia zmienności z przyczyn losowych i z przyczyn wyznaczalnych, wyróżnia także dodatkowy, trzeci typ zmienności – zmienność strukturalną (ang. *structural variation*), powstającą z powodu różnic pomiędzy równoległymi częściami procesu, którą uznaje za specjalny rodzaj zmienności z przyczyn wyznaczalnych. Z kolei Britz *et al.* (2000, s.34) wymieniają aż cztery typy zmienności, wśród których, oprócz typowej zmienności z przyczyn losowych (ang. *common cause variation*) i z przyczyn specjalnych (ang. *special cause variation*), a także zmienności związanej z sytuacją, gdy średnia procesu jest różna od wartości celowej (ang. *off-target variation*), także wyróżniają zmienność strukturalną (ang. *structural variation*). Britz *et al.* uważają przy tym, że zmienność strukturalna łączy w sobie cechy zmienności z przyczyn losowych i specjalnych, ponieważ jest to według nich zmienność wbudowana w istniejący system, ale jednocześnie wyglądająca na zmienność powodowaną przyczynami specjalnymi – przyjmującą postać regularnych, systematycznych cykli czy trendów. Jednak, zgodnie z definicją zaproponowaną przez Britz *et al.* (2000, s.34), przyczyny zmienności strukturalnej są przewidywalne, co odróżnia ją od zmienności powodowanej przyczynami specjalnymi. Ten dodatkowy rodzaj zmienności, czyli tzw. zmienność strukturalną, można odnieść do wspomnianej wyżej koncepcji rodzin zmienności, do której nawiązuje także Shewhart w ramach wyróżnionego przez siebie Typu I

wyznaczalnych przyczyn zmienności. Jednak, wbrew przypisaniu przez Shewharta „różnic pomiędzy maszynami” do przyczyn wyznaczalnych, Deming umieścił „mieszanie wyrobów z różnych strumieni produkcji” na opracowanej przez siebie liście losowych przyczyn zmienności (Deming, 1994, s.336-337). Jest to zgodne z proponowanym przez Deminga rozumieniem przyczyn losowych jako należących do systemu, a zatem właściwych dla aktualnego procesu i rozumieniem przyczyn specjalnych jako wynikających ze szczególnych okoliczności i nie należących do stałego systemu. W myśl tego rozumowania, produkowanie danego typu wyrobów na różnych maszynach czy liniach produkcyjnych powinno być, jak to ma miejsce u Deminga, zaliczone do przyczyn losowych – związanych ze stałym systemem. Identyfikacja strumieni produkcji i wynikającej z ich połączenia zmienności, mająca odniesienie do koncepcji rodzin zmienności, jest uważana przez Deminga (1994, s.354-356) za jeden z ważnych sposobów doskonalenia procesu.

3.1.4. Głos Klienta a Głos Procesu

Poruszając kwestię doskonalenia procesów, należy wyraźnie odróżnić zmienność charakteryzującą dany proces – nazywaną czasem Głosem Procesu (ang. *Voice of the Process*, VOP) od wymagań stawianych przed procesem, wyrażanych w postaci specyfikacji – nazywanych Głosem Klienta (ang. *Voice of the Customer*, VOC). Sprawienie aby Głos Procesu odpowiadał na Głos Klienta jest podstawowym celem zarządzania jakością procesu, a uświadomienie sobie znaczenia Głosu Procesu i „słuchanie” go – warunkiem osiągnięcia tego celu. Takie podejście – w odróżnieniu od kierowania się wyłącznie Głosem Klienta – którego podstawą jest rozróżnienie zmienności naturalnej procesu od ewentualnych zmienności z przyczyn specjalnych (przy użyciu kart przebiegu procesu lub kart kontrolnych) umożliwia skuteczne i świadome doskonalenie procesów (Nolan i Provost, 1990, s.71; Wheeler, 1999; Wheeler, 2008, s.129-135). Ponieważ istnieją dwie możliwe sytuacje odnośnie zmienności, jaką może wykazywać proces (Głos Procesu), to znaczy:

- stan, w którym proces jest statystycznie stabilny – wyłącznie pod działaniem przyczyn specjalnych,
lub
- stan, w którym proces nie jest statystycznie stabilny – pod wpływem przyczyn specjalnych,

a także dwie możliwe sytuacje, z uwagi na spełnienie wymagań stawianych przed procesem (Głos Klienta), mianowicie:

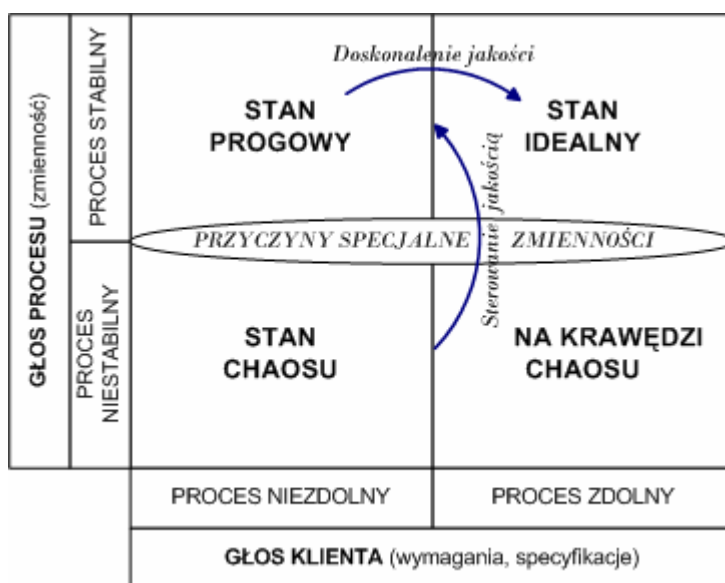
- proces zdolny – spełnia wymagania,
lub
- proces niezdolny – nie spełnia wymagań (pewna ilość produkowanych wyrobów niezgodnych),

zatem, w wyniku możliwych kombinacji, można wyróżnić cztery główne stany, w jakich może się znajdować każdy proces (Rysunek 3.5):

- 1) Stan chaosu – proces jest niestabilny i powstają w nim wyroby niezgodne. W pierwszej kolejności należy zidentyfikować i usunąć przyczyny specjalne zmienności, aby ustabilizować proces, a następnie ponownie porównać Głos Procesu (zmienność naturalną) z Głosem Klienta (wymaganiami) i – jeśli okaże się to konieczne – podjąć działania w kierunku doskonalenia procesu poprzez redukcję jego naturalnej zmienności.
- 2) Stan na krawędzi chaosu – proces jest niestabilny, ale nie powstają w nim wyroby niezgodne. W tym stanie wszystko może się zmienić w każdej chwili i w procesie

mogą zacząć powstawać wyroby niezgodne. Przede wszystkim należy podjąć działania w celu stabilizacji procesu, poprzez identyfikację i usunięcie przyczyn specjalnych zmienności. Następnie należy ponownie porównać Głos Procesu (zmienność naturalną) z Głosem Klienta (wymaganiami), a – w razie potrzeby – przejść do doskonalenia procesu poprzez redukcję jego naturalnej zmienności.

- 3) Stan progowy – proces jest stabilny, ale powstają w nim wyroby niezgodne. Należy utrzymywać proces pod kontrolą i podjąć działania w kierunku doskonalenia procesu poprzez redukcję jego naturalnej zmienności.
- 4) Stan idealny – proces jest stabilny i nie powstają w nim wyroby niezgodne. Należy utrzymywać proces pod kontrolą.



Rys.3.5. Cztery możliwe stany procesu, z uwagi na Głos Procesu i Głosu Klienta

Źródło: opracowanie na podstawie Wheeler i Chambers, 1992, s.15-19

W kontekście powyżej przedstawionych czterech możliwych stanów procesu, działania obejmujące Sterowanie jakością polegają na przejściu ze stanu niestabilnego procesu (stan chaosu i stan na krawędzi chaosu) do stanu stabilnego (stan progowy i stan idealny), co jest możliwe poprzez pokonanie bariery, jaką stanowią przyczyny specjalne zmienności. Natomiast Doskonalenie jakości to dążenie do uzyskania stanu idealnego poprzez sprawienie, aby Głos Procesu w pełni odpowiadał na Głos Klienta. Odbywa się ono z reguły poprzez redukcję zmienności naturalnej procesu. W niektórych przypadkach, możliwe może okazać się także dostosowanie wymagań do zmienności procesu – np. Wheeler i Chambers (1992, s.15) wymieniają dwa równorzędne sposoby przejścia do „stanu idealnego”: zmianę procesu (a zatem dostosowanie Głosu Procesu do Głosu Klienta) oraz zmianę specyfikacji (czyli dostosowanie Głosu Klienta do Głosu Procesu). Należy jednak zauważyć, że zmiana specyfikacji może zostać dokonana wyłącznie w uzasadnionych przypadkach, i nie powinna być traktowana jako jedyne działanie podejmowane w celu zapewnienia, by proces spełniał wymagania.

Powyższe schematyczne zestawienie czterech możliwych stanów procesu podkreśla istnienie dwóch obszarów, których zrozumienie jest kluczowe dla odpowiedniego zarządzania jakością procesu – Głosu Procesu i Głosu Klienta. W praktyce często brakuje odpowiedniej świadomości istnienia tych dwóch różnych aspektów, których rozróżnienie i jednoczesne

wzięcie pod uwagę jest niezbędne przy dążeniu do stanu idealnego – uzyskania procesu stabilnego i spełniającego stawiane przed nim wymagania.

3.1.5. Pojęcie zmienności procesu – podsumowanie

Podsumowując, należy podkreślić, że:

- Rozróżnienie dwóch podstawowych rodzajów zmienności ma kluczowe znaczenie dla dokonania właściwego wyboru odpowiedniego sposobu postępowania w ramach zarządzania jakością dowolnego procesu, ponieważ każdy z dwóch podstawowych rodzajów zmienności wymaga innego rodzaju działań.
- Spośród wielu stosowanych określeń, nazwy „przyczyny losowe zmienności” – rozumiane jako będące częścią systemu, i „przyczyny specjalne zmienności” (w odróżnieniu od przyczyn „wyznaczalnych”) – rozumiane jako nie będące częścią systemu, stosowane są najpowszechniej i wydają się najpełniej oddawać sens pojęć, jakie za nimi stoją. Taka terminologia będzie zatem stosowana w dalszej części tej pracy.
- Do odróżnienia zmienności naturalnej procesu od zmienności z przyczyn specjalnych potrzebne jest tzw. Myślenie Statystyczne, a podstawowym narzędziem służącym do tego celu są karty przebiegu procesu i karty kontrolne.
- Identyfikacja i usuwanie specjalnych przyczyn zmienności nazywane jest Rozwiązywaniem problemów i pozwala jedynie ustabilizować proces. Doskonalenie procesu, mające na celu podniesienie go na nowy poziom jakości, jest zadaniem trudniejszym i wymaga podjęcia działań zmierzających do redukcji jego zmienności naturalnej (wynikającej z przyczyn losowych).
- Aby przystąpić do Doskonalenia procesu, należy najpierw stwierdzić, czy na proces nie oddziałują specjalne przyczyny zmienności, powodujące, że proces znajduje się w stanie statystycznie niestabilnym. Jeśli tak jest, należy w pierwszej kolejności przejść do Rozwiązania problemów (czyli zidentyfikować i usunąć specjalne przyczyny zmienności procesu), aby uzyskać statystycznie stabilny, kontrolowany stan procesu, w którym mamy do czynienia wyłącznie z jego naturalną zmiennością.
- Celem doskonalenia jest osiągnięcie „stanu idealnego” procesu. Dążenie do takiego stanu jest zalecane, jednocześnie jednak przebieg postępowania w ramach Doskonalenia procesu jest opisywany w literaturze mniej szczegółowo niż proces Rozwiązywania problemów.
- Zauważyć można dwa różne podejścia do zmienności procesu wynikającej z przyczyn losowych:
 - 1) Identyfikacja przyczyn zmienności naturalnej procesu uważana jest za niemożliwą. Redukcja zmienności procesu wywołanej przyczynami losowymi możliwa jest jedynie poprzez „fundamentalną zmianę” procesu, jednak szczegółowy sposób identyfikacji takiej zmiany nie jest wskazywany.
 - 2) Możliwe i konieczne dla doskonalenia jest znalezienie przyczyn zmienności naturalnej procesu. Bardziej szczegółowo opisywane są sposoby prowadzące do wprowadzenia zmiany w procesie. Podawane są wskazówki dotyczące identyfikacji przyczyn zmienności naturalnej, wykorzystywana jest m.in. koncepcja rodzin zmienności oraz czynnika dominującego.

- Należy wyraźnie rozróżnić dwa aspekty składające się na jakość procesu: Głos Procesu i Głos Klienta. W dążeniu do osiągnięcia „stanu idealnego” procesu konieczne jest podejmowanie działań, których celem będzie sprawienie, aby Głos Procesu odpowiadał na Głos Klienta.

Trzeba również podkreślić, że pomimo iż wiedza związana z dwoma podstawowymi rodzajami zmienności procesów nie jest nowa, wydaje się, że wciąż nie jest ona dość rozpowszechniona, co często powoduje niewłaściwe pojmowanie zagadnienia doskonalenia procesów. Wielu praktyków Zarządzania Jakością wciąż na nowo stara się rozpowszechniać tę wiedzę, która ma kluczowe znaczenie dla właściwego zarządzania jakością procesów.

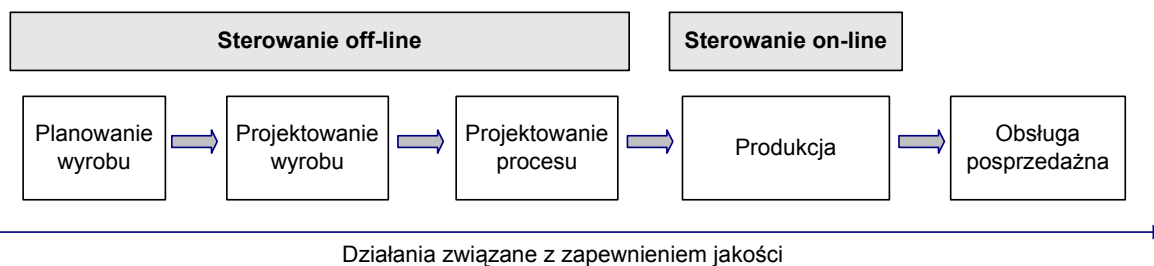
3.2. Sterowanie jakością on-line i off-line

W wielu źródłach literaturowych rozróżnia się dwa podejścia do szeroko rozumianego zarządzania jakością, określane jako sterowanie jakością on-line i off-line. Można jednak zauważyć, że określenia te nie są jednoznacznie interpretowane i różni autorzy nadają im nieco inne znaczenie. Ponadto, należy zauważyć, że pomimo stosowania określenia „sterowanie jakością” – które Juran definiował jako działania związane z rozwiązywaniem tzw. problemów sporadycznych i odróżniał od działań związanych z Doskonaleniem jakości dokonywanym poprzez rozwiązywanie tzw. problemów chronicznych – pojęcia „sterowanie jakością on-line” i „sterowanie jakością off-line” stosowane są w odniesieniu do różnego rodzaju działań zmierzających do zapewnienia odpowiedniego poziomu jakości wyrobów.

W najszerszym ujęciu pojęcia sterowania jakością on-line i off-line interpretuje Genichi Taguchi, odnosząc je do głównych działań inżynierskich związanych z zapewnieniem jakości (Rysunek 3.6). Zgodnie z jego interpretacją (Taguchi *et al.*, 1989, s.4), działania zmierzające do zapewnienia jakości, prowadzone na etapach planowania i projektowania wyrobu, a także projektowania procesu, to tzw. sterowanie jakością off-line. Natomiast odpowiednie działania związane z zapewnieniem jakości, prowadzone podczas produkcji nazywane są sterowaniem jakością on-line. Taguchi podkreśla, że do realizacji każdego z tych dwóch podejść odpowiednie są inne metody. Do prowadzenia działań off-line proponuje podejście nazywane „*Robust Engineering*”, polegające na takim projektowaniu wyrobów i procesów, aby były one jak najmniej wrażliwe na szeroko rozumiane zakłócenia (od ang. *robustness* – odporność). Podejście to polega na realizacji trzech głównych zadań, do których zalicza się:

- 1) Projektowanie systemu (ang. *System Design*);
- 2) Projektowanie parametrów (ang. *Parameter Design*);
- 3) Projektowanie tolerancji (ang. *Tolerance Design*).

Z kolei działania określane przez Taguchi’ego jako sterowanie on-line obejmują głównie monitoring procesu i wykorzystywanie uzyskiwanej dzięki niemu informacji zwrotnej, oraz podejmowanie odpowiednich działań, bazując na rachunku strat jakości i kosztów. Taguchi podkreśla, że redukcja zmienności może zostać osiągnięta zarówno przez zastosowanie sterowania jakością on-line, jak i off-line (Taguchi *et al.*, 1989, s.27).



Rys.3.6. Sterowanie jakością on-line i off-line, w kontekście działań inżynierskich związanych z zapewnieniem jakości, według Taguchi’ego

Źródło: opracowanie własne na podstawie Taguchi *et al.*, 1989

Inne podejście do interpretacji terminów on-line i off-line, w odniesieniu do obszaru Zarządzania Jakością, prezentuje Szkoda (2004, s.16). Wyróżnia on:

- Zapewnienie jakości przez kontrolę jakości wyrobów dokonywaną w trybie off-line, czyli po zrealizowanym procesie produkcyjnym – podejście nastawione na wykrywanie braków;
- Strategię zapewnienia jakości przez sterowanie jakością procesu produkcyjnego w trybie on-line (który określa też jako działanie „w czasie rzeczywistym”) – którą nazywa realizacją tzw. orientacji procesowej w zapewnieniu jakości; oraz
- Strategię mieszaną.

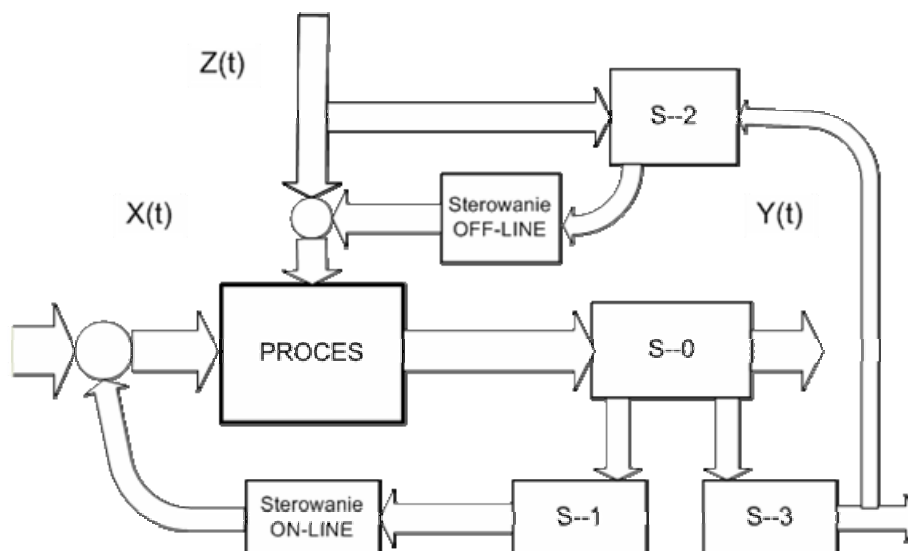
Ujęcie przedstawiane przez Szkołę polega więc na rozróżnieniu działań związanych z prewencją i doskonaleniem procesu (określanych tu jako sterowanie on-line) od działań skierowanych na wykrywanie braków.

Z kolei Jednoróg (2001) proponuje odmienną interpretację określeń: sterowanie jakością on-line i off-line, które definiuje jako (Jednoróg, 2001, s.76):

- Sterowanie on-line – optymalizacja lokalna procesu produkcyjnego za pomocą bezpośredniej korekcji wielkości sterowanych procesu, w ramach których decyzje podejmowane są na podstawie kontroli i obserwacji procesu (np. za pomocą SPC), obejmująca działania na poziomie operacyjnym;
- Sterowanie off-line – optymalizacja globalna za pomocą korekcji stanu zasobów i otoczenia procesu, w ramach której aktualne decyzje podejmowane są w oparciu o strategię i cele przedsiębiorstwa i mogą obejmować np. zmianę konstrukcji lub specyfikacji, zmianę planu obróbki, zakup maszyny, czy dodatkowe szkolenie.

Inną interpretację określeń: sterowanie on-line i off-line proponuje Płaska (2000, s.69-77). Sterowaniem procesem on-line nazywa on korekcję realizowaną w trybie nadążnym (z reguły przy wykorzystaniu systemu komputerowego), polegającą na regulowaniu parametrów procesu (X), na podstawie pomiarów charakterystyki wyjściowej (Y), wykonywanych podczas przebiegu danego procesu^{**}. Z kolei sterowanie procesem off-line, według Płaski, polega na likwidacji oddziałujących na proces zakłóceń (Z) i obejmuje działania podejmowane w celu ich wykrycia, określenia ich wpływu na wynik procesu oraz usunięcia ich źródeł. Dlatego też sterowanie off-line, w odróżnieniu od sterowania on-line, dotyczy działań, które są rozłożone w czasie. Koncepcję sterowania procesem on-line i off-line w ujęciu Płaski przedstawiono na Rysunku 3.7.

^{**} Taka interpretacja sterowania on-line wiąże się z zagadnieniem kompensacji błędów obróbki on-line, stosowanej w przypadku obrabiarek sterowanych numerycznie, które zostało opisane w Rozdziale 2.4 niniejszej pracy.



Rys.3.7. Schemat nadzorowania i oceny jakości dowolnego procesu wytwarzania, według Płaska

Legenda:

S-0 – blok służący do analizy danych

S-1 – blok służący do nadzorowania i optymalizacji obwodu korygującego proces w trybie nadążnym (on-line)

S-2 – blok służący do realizacji zadań związanych ze sterowaniem off-line

S-3 – blok służący do oceny jakości procesu

Źródło: Płaska, 2000, s.75

W Tabeli 3.3 zebrano definicje sterowania jakością (procesem) on-line i off-line, według opisanych wyżej podejść.

Tabela 3.3. Zestawienie różnych interpretacji pojęć: sterowanie jakością/procesem on-line i off-line

Źródło	ON-LINE	OFF-LINE
Taguchi <i>et al.</i> (1989)	Sterowanie jakością on-line (ang. <i>On-Line Quality Control</i>) – Działania prowadzone podczas produkcji. Jakość kształtowana przez „produkujących” (ang. <i>makers</i>).	Sterowanie jakością off-line (ang. <i>Off-Line Quality Control</i>) – Działania prowadzone podczas etapów projektowania, planowania i opracowania wyrobu i procesu. Jakość kształtowana przez projektujących (ang. <i>designers</i>).
Szkoda (2004, s.16)	Sterowanie jakością w trybie on-line – Działania wykonywane „w czasie rzeczywistym”. Tzw. orientacja procesowa w zapewnianiu jakości.	Kontrola jakości wyrobów w trybie off-line – Działania wykonywane po zrealizowanym procesie produkcyjnym, skierowane na wykrywanie braków.
Jednoróg (2001, s.76)	Sterowanie jakością on-line – optymalizacja lokalna procesów produkcyjnych za pomocą bezpośredniej korekcji wielkości sterowanych procesu. Działania prowadzone na poziomie operacyjnym.	Sterowanie jakością off-line – optymalizacja globalna za pomocą korekcji stanu zasobów i otoczenia procesu. Działania obejmujące wszystkie poziomy przedsiębiorstwa.
Płaska (2000, s.69-77)	Sterowanie procesem on-line – korekcja procesu (poprzez wpływ na wielkości przyczynowe w procesie) wykonywana w trybie nadążnym.	Sterowanie procesem off-line – usunięcie działających na proces zakłóceń poprzez: ich wykrycie, określenie ich wpływu na charakterystyki wyjściowe procesu i zlikwidowanie ich źródeł.

Źródło: opracowanie własne

Wobec tak różnych podejść, działania mające na celu doskonalenie istniejących procesów poprzez redukcję ich naturalnej zmienności, można – w zależności od przyjętego podejścia – zaliczyć zarówno do działań typu on-line, jak i off-line:

- Zarówno według interpretacji Taguchi’ego, jak i Szkody, obszar niniejszej pracy – dotyczący działań zmierzających do doskonalenia procesu (poprzez redukcję jego naturalnej zmienności), prowadzonych podczas przebiegu procesu – może być określony jako sterowanie jakością on-line.
- Z kolei w ujęciu prezentowanym przez Płaskę, a także Jednoroga, pojęcie sterowania wydaje się mieć nieco węższe znaczenie i odnosić się przede wszystkim do działań określanych jako klasycznie rozumiane sterowanie jakością (zgodnie z definicją Jurana), mające na celu utrzymanie procesu w stanie ustabilizowanym. Mimo to, można w prezentowanej przez nich koncepcji sterowania off-line dostrzec analogię do działań mających na celu doskonalenie procesów poprzez redukcję ich naturalnej zmienności, które wymagają identyfikacji przyczyn zmienności procesu, przez co są z reguły złożone i czasochłonne. Jednocześnie jednak należy zauważyć, że przyczyny zmienności naturalnej procesu mogą być związane zarówno z samymi parametrami procesu (jak w przypadku sterowania on-line, w ujęciu Płaski i Jednoroga), jak i innymi czynnikami, takimi jak np. stan maszyn i urządzeń, stosowane metody czy materiały (jak w przypadku sterowania off-line, w ujęciu Płaski i Jednoroga).

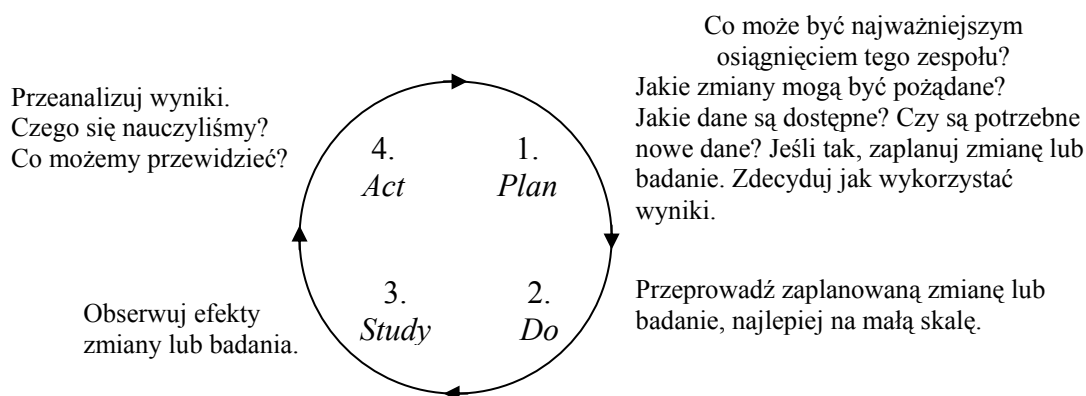
3.3. Sposoby doskonalenia procesów

Teoria i praktyka Zarządzania Jakością ukształtowała wiele różnych sposobów postępowania ze zmiennością procesów. W zależności od tego, czy celem jest identyfikacja i wyeliminowanie specjalnych przyczyn zmienności, czy minimalizacja naturalnej zmienności procesu, sposoby te można podzielić na dwie grupy i – zgodnie z nazewnictwem przedstawionym w Rozdziale 3.1.2 – przyporządkować odpowiednio do sposobów Rozwiązywania problemów (ang. *Problem Solving*) oraz Doskonalenia procesów (ang. *Process Improvement*) lub też Ciągłego doskonalenia (ang. *Continuous Improvement*), choć nie zawsze rozróżnienie takie jest dokonywane przez autora prezentującego dany sposób postępowania. Sposoby te, przedstawiane w postaci algorytmów o różnym stopniu szczegółowości, wskazują i opisują kolejne etapy działania, jakie należy przejść w celu rozwiązania problemu, objawiającego się w postaci zmienności specjalnych procesu, lub w celu doskonalenia procesu poprzez zmniejszenie jego naturalnej zmienności. Analiza literatury związanej z Zarządzaniem Jakością pozwala zidentyfikować wiele różnych opracowań przedstawiających sposoby Rozwiązywania problemów oraz Doskonalenia procesów. Ponadto, można również znaleźć wiele tego typu algorytmów prezentowanych w ofercie różnego rodzaju firm doradczych i szkoleniowych.

Zgodnie z określonym w Rozdziale 1. i uzasadnionym w pierwszej części Rozdziału 3. zakresem niniejszej pracy, w dalszej części tego rozdziału skupiono się na sposobach tzw. Doskonalenia procesów, które mają zastosowanie przy redukcji ich naturalnej zmienności (wynikającej z przyczyn losowych). Pominięto natomiast sposoby tzw. Rozwiązywania problemów (przeznaczone do identyfikacji i usuwania specjalnych przyczyn zmienności procesów), które stanowią odrębne zagadnienie.

3.3.1. Cykl Shewharta (PDSA)

Pomimo wielości i różnorodności prezentowanych w różnych źródłach sposobów redukcji zmienności procesów, każdy z nich można odnieść do cyklu doskonalenia opracowanego przez Shewharta, a rozpropagowanego przez Deminga (1994, s.88) jako „cykl Shewharta” (Rysunek 3.8). Cykl ten znany jest również od nazwiska swojego propagatora jako „cykl Deminga”, często nazywany jest też cyklem „Planuj-Wykonaj-Studiu-Działaj” (ang. *Plan-Do-Study-Act*, tłumaczenie za: Thompson *et al.*, 2005, s.43-44) lub po prostu PDSA – od nazw jego kolejnych czterech etapów.



- Krok 5. Powtórz Krok 1., uwzględniając zdobytą wiedzę.
Krok 6. Powtórz Krok 2. i kolejne.

Rys.3.8. – Cykl Shewharta (Cykl PDSA)

Źródło: na podstawie Deming, 1994, s.88

Należy podkreślić, że – zgodnie z Krokiem 6. – cykl PDSA powinien być powtarzany, aby realizować ideę ciągłego doskonalenia, wykorzystując wiedzę uzyskaną w każdym przeprowadzonym cyklu. Taka kontynuacja jest podkreślana również dzięki nazwie – często stosuje się określenia takie jak „pętla ciągłego sprzężenia zwrotnego” (ang. *continuous feedback loop*; Gupta, 2006, s.45) czy „spirala ciągłego doskonalenia” (Deming, 1994, s.180-181; Thompson *et al.*, 2005, s.43-44). Już samo użycie słowa „cykl” (np. „cykl Deminga”, w odróżnieniu od stosowanego czasem zamiennie określenia „koło Deminga”) odzwierciedla dynamiczny i iteracyjny charakter tego modelu doskonalenia.

Pomimo, że pierwotnie cykl PDSA powstał w formie przedstawionej powyżej, później został szeroko rozpropagowany jako cykl PDCA (Moen *et al.*, 1999, s.13-17; Johnson, 2002) – w tej wersji etap trzeci „Studiu” (ang. *Study*) został zastąpiony przez „Sprawdź” (ang. *Check*). Taka wersja cyklu Shewharta stała się bardzo szeroko znana (np. DeFeo i Barnard, 2004, s.96; Łańcucki, 2006, s.269; Hamrol, 2007, s.120), jednak sam Deming uznał po latach, że słowo „Studiu” (*Study*) lepiej oddaje ideę doskonalenia – dogłębnej analizy procesu w celu redukcji jego naturalnej zmienności, podczas gdy określenie „Sprawdź” (*Check*) może być rozumiane jako ograniczenie się do przeprowadzenia sprawdzenia, pozbawionego aspektu analizy i budowania nowej wiedzy o procesie, co może być interpretowane jako typowa inspekcja procesu, zamiast dążenia do jego doskonalenia (Gupta, 2006; Langley *et al.*, 1996, s.6). Wydaje się, że – z uwagi na skojarzenie „sprawdzenia” ze sprawdzaniem czy proces spełnia wymagania – cykl PDCA może być interpretowany jako kierowanie się wyłącznie Głosem Klienta, natomiast cykl PDSA – dzięki przeprowadzaniu

analizy procesu w ramach etapu „Studiuj” – jest ukierunkowany na doskonalenie, poprzez słuchanie i odpowiednie dostosowywanie Głosu Procesu. Dlatego to właśnie cykl PDSA zalecany jest jako odpowiedni do stosowania w celu doskonalenia procesu, rozumianego jako dążenie do redukcji jego naturalnej zmienności.

Cykl PDSA stanowi uniwersalny cykl doskonalenia, do którego można odnieść wiele innych sposobów Doskonalenia procesów. W Tabeli 3.4 zestawiono wybrane sposoby Doskonalenia Procesów i odniesiono je do cyklu doskonalenia PDSA. Wśród zebranych sposobów znalazły się zarówno modele uniwersalne, których autorzy nie rozróżniają zmienności procesu wynikającej z przyczyn losowych od zmienności z przyczyn specjalnych, jak i bardziej szczegółowe algorytmy, ukierunkowane na redukcję zmienności naturalnej procesu (wynikającej z przyczyn losowych). Zestawione w Tabeli 3.4 sposoby doskonalenia procesów omówiono w dalszej części Rozdziału 3.3.

3.3.2. Sposoby doskonalenia procesów – modele uniwersalne

Pierwsza grupa sposobów doskonalenia to sposoby najbardziej ogólne, których kroki wpisują się w cykl PDSA. Autorzy tych modeli posługują się określeniem „doskonalenie procesu”, jednocześnie nie rozróżniając dwóch podstawowych rodzajów zmienności, zatem można uznać, że są to modele uniwersalne, przeznaczone do celów szeroko rozumianego doskonalenia. Ich kolejne etapy wykazują bardzo duże podobieństwo do głównych etapów cyklu PDSA.

W ramach takiego podejścia Parsons (1992) prezentuje „Podstawowy proces doskonalenia procesu” (ang. *Basic Process Improvement Process*), składający się z sześciu głównych kroków. Na identyfikację problemu przypadają dwa pierwsze kroki: Zdefiniowanie sytuacji i Opisanie problemu, analizie problemu odpowiada tu Określenie przyczyn źródłowych, etapy Wykonaj (*Do*) i Studiuj (*Study*) cyklu PDSA zastępuje tutaj krok Generowanie i ewaluacja rozwiązania, a dwa ostatnie kroki: Wdrożenie rozwiązania i walidacja skutków oraz Utrzymanie rozwiązania przypadają na etap Działaj (*Act*) PDSA.

Podobieństwo do cyklu PDSA cechuje również „Proces rozwiązywania problemów” (ang. *The Problem-Solving Process*) prezentowany przez MacDuffie’ego (1997, s.481). Autor stosuje określenie „rozwiązywanie problemów” (które, zgodnie z wcześniej opisaną terminologią, mogłoby sugerować przeznaczenie do postępowania ze zmiennością procesów wynikającą z przyczyn specjalnych), jednocześnie jednak szeroko rozumiejąc pojęcie „problem” (również jako możliwość doskonalenia), dlatego prezentowany przez niego model ma charakter uniwersalny. W przedstawionym przez MacDuffie’ego „Procesie rozwiązywania problemów” pierwsze dwa kroki: Zdefiniowanie problemu i Analiza problemu, odpowiadają dwóm głównym etapom kroku Planuj (*Plan*) cyklu PDSA. Krok trzeci: Generowanie i wybór rozwiązań, oraz czwarty: Testowanie i ewaluacja rozwiązań, to odpowiedniki Wykonaj (*Do*) i Studiuj (*Study*) z PDSA. Natomiast ostatni, piąty krok tego modelu, jakim jest: Opracowanie nowych procedur, jest odzwierciedleniem ostatniego kroku cyklu PDSA – Działaj (*Act*).

W ramach normy PN-EN ISO 9004:2001, w której zawarte są wytyczne doskonalenia funkcjonowania odnoszące się do systemów zarządzania jakością, w załączniku B przedstawiony jest zalecany „Proces ciągłego doskonalenia” (Polski Komitet Normalizacyjny, 2001, s.123-125). Jego główne etapy, wyróżnione w 7 podpunktach, odpowiadają siedmiu krokom procesu doskonalenia jakości (ang. *The Seven-Step Quality Process*) przedstawionego przez Schneidermana (1998, s.38). Dwa pierwsze kroki obydwu powyższych modeli doskonalenia obejmują Identyfikację tematu/problemu oraz Zebranie i analizę danych.

Kolejny krok, zawierający się w etapie Planuj (*Plan*) cyklu PDSA, dotyczy zadania analizy i identyfikacji przyczyn ogólnie rozumianego problemu. Odpowiednikiem kroku Wykonaj (*Do*) jest etap Identyfikacji, planowania i wdrożenia rozwiązania, a krokowi Studiuj (*Study*) odpowiada Ocena wyników. Ostatnie dwa kroki obu modeli to Wdrożenie i standaryzacja rozwiązania oraz Ocena wdrożenia rozwiązania, ewentualne przeniesienie go na inne obszary i przejście do kolejnego problemu, co odpowiada ostatniemu krokowi cyklu PDSA.

Kolejny model doskonalenia to DMAIC, stosowany w ramach strategii Six Sigma (Bertels, 2003, s.198-199; Snee i Hoerl, 2003, s.194; DeKoning i DeMast, 2006, s.775-778). Nazwa tego popularnego w ostatnich latach modelu doskonalenia pochodzi od pierwszych liter jego kolejnych pięciu etapów, powszechnie znanych pod swoimi angielskimi nazwami: *Define* (pol. Zdefiniuj), *Measure* (pol. Zmierz), *Analyze* (pol. Przeanalizuj), *Improve* (pol. Udoskonal) i *Control* (pol. Steruj). Znajdują one odzwierciedlenie w kolejnych krokach cyklu PDSA: pierwsze trzy z nich odpowiadają etapowi Planuj (*Plan*), czwarty obejmuje etapy Wykonaj (*Do*) i Studiuj (*Study*), a piąty jest odpowiednikiem etapu Działaj (*Act*). Należy zauważyć, że – w odróżnieniu od wcześniej przedstawionych modeli doskonalenia – DMAIC wyodrębnia proces pomiaru jako oddzielny etap postępowania. Takie wyraźne podkreślenie działań związanych z zebraniem danych do dalszych analiz, można też zauważyć w większości kolejnych, omówionych niżej, modeli doskonalenia.

Do grupy ogólnych/universalnych modeli doskonalenia można zaliczyć także model przedstawiony przez Hamrola (2007, s.122) jako „Etapy rozwiązywania problemów w Zarządzaniu Jakością”. Pomimo użycia słowa „problem”, które może być kojarzone z oddziaływaniem na proces przyczyny specjalnej zmienności, autor podkreśla, że w odniesieniu do tego modelu doskonalenia problem należy rozumieć szeroko, a więc nie tylko jako konieczność przeprowadzenia działań naprawczych, ale też jako możliwość doskonalenia. Przedstawiony przez Hamrola sposób postępowania składa się z siedmiu kroków. Trzy pierwsze z nich, to znaczy: Zauważenie i zrozumienie problemu, Zbieranie danych oraz Identyfikacja przyczyn problemu, mieszczą się w zakresie kroku Planuj (*Plan*) cyklu PDSA. Następny krok: Zaprojektowanie i wdrożenie rozwiązania, to odpowiednik etapu Wykonaj (*Do*) PDSA, a kolejny: Analiza słabych punktów rozwiązania, odpowiada etapowi Studiuj (*Study*). Etap Działaj (*Act*) cyklu PDSA reprezentowany jest przez dwa ostatnie kroki omawianej metodyki: Wdrożenie rozwiązania, oraz Monitorowanie systemu po wdrożeniu.

3.3.3. Sposoby doskonalenia procesów – modele umożliwiające wybór odpowiedniej strategii redukcji zmienności procesu

Odmienne od wyżej omówionych, ogólnych i uniwersalnych sposobów doskonalenia procesów, przedstawiają Steiner i MacKay (2005), którzy opracowali „Algorytm przeznaczony do redukcji zmienności w procesach wytwórczych” (ang. *Algorithm for Reducing Variation in Manufacturing Processes*). Proponowany przez nich sposób opiera się na zastosowaniu jednego z siedmiu podejść do redukcji zmienności, do których autorzy zaliczają:

- 1) Naprawienie tego, co oczywiste, wykorzystując wiedzę o dominującej przyczynie zmienności;
- 2) Uniewrażliwienie procesu na zmienność dominującej przyczyny poprzez zmianę wejść procesu;
- 3) Sterowanie „w przód” na podstawie wartości dominującej przyczyny;
- 4) Sterowanie „w tył” na podstawie wartości wyjścia procesu;

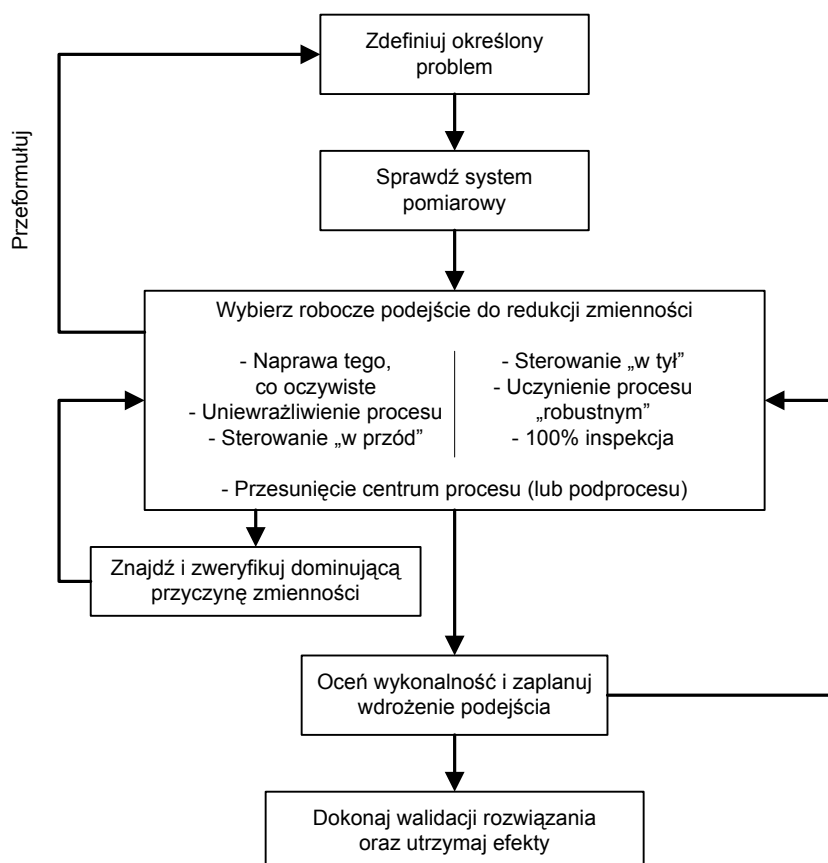
Tabela 3.4. Zestawienie wybranych sposobów Doskonalenia procesów

Źródło	Nazwa	Kolejne etapy działania										
		PLAN (Planuj)				DO (Wykonaj)		STUDY (Studuj)	ACT (Działaj)			
(Deming, 1994, s.88)	cykl Shewharta (PDSA)	Identyfikacja problemu		Analiza problemu			Generowanie rozwiązań	Wdrożenie rozwiązania	Ewaluacja i analiza wyników	Standaryzacja rozwiązania		
(Parsons, 1992)	Basic Process Improvement Process	Zdefiniowanie sytuacji	Opisanie problemu	Określenie przyczyn źródłowych			Generowanie i ewaluacja rozwiązania		Wdrożenie rozwiązania i walidacja skutków	Utrzymanie rozwiązania		
(MacDuffie, 1997, s.481)	The Problem Solving Process	Zdefiniowanie problemu		Analiza problemu			Generowanie i wybór rozwiązań	Testowanie i ewaluacja rozwiązań		Opracowanie nowych procedur		
(Schneiderman, 1998, s.38)	The 7-step Quality Process	Identyfikacja tematu		Zebranie i analiza danych			Analiza przyczyn	Planowanie i wdrożenie rozwiązania	Ewaluacja wyników	Standaryzacja	Przemyślenie i przejście do kolejnego problemu	
(Polski Komitet Normalizacyjny, 2001, s.123-125: Załącznik B)	Proces ciągłego doskonalenia	Powody doskonalenia: identyfikacja problemu i wybór obszaru		Bieżąca sytuacja: zebranie i analiza danych			Analiza: identyfikacja i weryfikacja przyczyn źródłowych	Identyfikacja możliwych rozwiązań: w tym wybór i wdrożenie wybranego rozwiązania	Ocena skutków	Wdrożenie i standaryzacja nowego rozwiązania	Ocena skuteczności i efektywności; ew. przeniesienie na inne obszary	
(Bertels, 2003)	DMAIC (Six Sigma)	Define (Zdefiniuj)		Measure (Zmierz)	Analyze (Przeanalizuj)			Improve (Udoskonal)		Control (Steruj)		
(Hamrol, 2007, s.122)	Etapy rozwiązywania problemów w ZJ	Zauważenie i zrozumienie problemu		Zbieranie danych	Identyfikacja przyczyn problemu			Zaprojektowanie i wdrożenie rozwiązania	Analiza słabych punktów rozwiązania	Wdrożenie rozwiązania	Monitorowanie systemu po wdrożeniu	
(Steiner i MacKay, 2005)	An Algorithm for Reducing Variation in Manufacturing Processes	Zdefiniowanie określonego problemu		Sprawdzenie systemu pomiarowego	Wybór podejścia do redukcji zmienności	Znalezienie dominującej przyczyny zmienności (badanie / weryfikacja)	Ponowne rozważenie wyboru podejścia do redukcji zmienności	Walidacja rozwiązania i utrzymanie efektów				
(Thornton, 2004)	Variation Risk Management	Identyfikacja (<i>Identification</i>)		Ocena (<i>Assessment</i>)	Łagodzenie (<i>Mitigation</i>)							
(Practical Process Improvement, 2008)	PPI - Practical Process Improvement	Misja		Określenie aktualnego stanu procesu	Uproszczenie procesu	Analiza danych		Znalezienie rozwiązań	Testowanie rozwiązania		Standaryzacja	Plany na przyszłość
(Ertan, 1998; Mitchell, 1999; Quinlan, 1999)	PVR - Process Variability Reduction	Zdefiniowanie procesu	Udokumentowanie procesu	Pomiar procesu	(Stabilizacja procesu)	Analiza procesu		Wdrożenie udoskonalenia	Ewaluacja i walidacja udoskonalenia	Udokumentowanie udoskonalenia		
(DeFeo i Barnard, 2004, s.35)	The Juran model of Breakthrough Improvement	Identyfikacja problemu	Ustanowienie projektu	Analiza objawów	Generowanie i testowanie teorii		Identyfikacja przyczyn źródłowych	Opracowanie udoskonaleń		Ustanowienie nowych kontroli	Przezwyciężenie oporu przed zmianą	Powielenie wyników
(wdp consulting, 2007)	RISE Process Improvement	Rozpoznanie (<i>Recognition</i>)		Badanie (<i>Investigation</i>): w tym ew. Stabilizacja procesu			Rozwiązanie (<i>Solution</i>)		Ewaluacja (<i>Evaluation</i>)			
(The ROI Alliance, Llc., 2008)	QIS - Quality Improvement Strategy	Pomiar (<i>Measure</i>)			Sterowanie (<i>Control</i>)	Dostosowanie (<i>Conform</i>)		Doskonalenie (<i>Improve</i>)				
(Rohleder i Silver, 1997)	Process Improvement framework	Wybór, zdefiniowanie i zrozumienie procesu	Usunięcie oczywistego marnotrawstwa	Monitorowanie procesu	Ocena stabilności procesu	Rozwiązanie problemów		Wdrożenie zmian				
						Wprowadzenie innowacji do procesu						
(Britz <i>et al.</i> , 2000, s.82-89)	The Process Improvement Strategy	Opisanie procesu		Zebranie danych dotyczących kluczowych miar procesu i wyrobu	Ocena stabilności procesu i usunięcie ewentualnych przyczyn specjalnych	Określenie zdolności procesu	Analiza zmienności naturalnej procesu	Zbadanie związków przyczynowo-skutkowych	Zaplanowanie i wdrożenie zmian			

Źródło: opracowanie własne

- 5) Uniewrażliwienie procesu na przyczyny zmienności (nazywane uczynieniem procesu „robustnym” – od angielskiego słowa „robustness”, czyli odporność) poprzez wybór i zmianę ustalonych wejść procesu, bez znajomości dominującej przyczyny zmienności;
- 6) 100-procentową inspekcję;
- 7) Przesunięcie centrum procesu bliżej celu.

Cały algorytm doskonalenia, w ramach którego stosuje się jedno z powyższych siedmiu podejść, obejmuje sześć kroków, które przedstawiono na Rysunku 3.9.

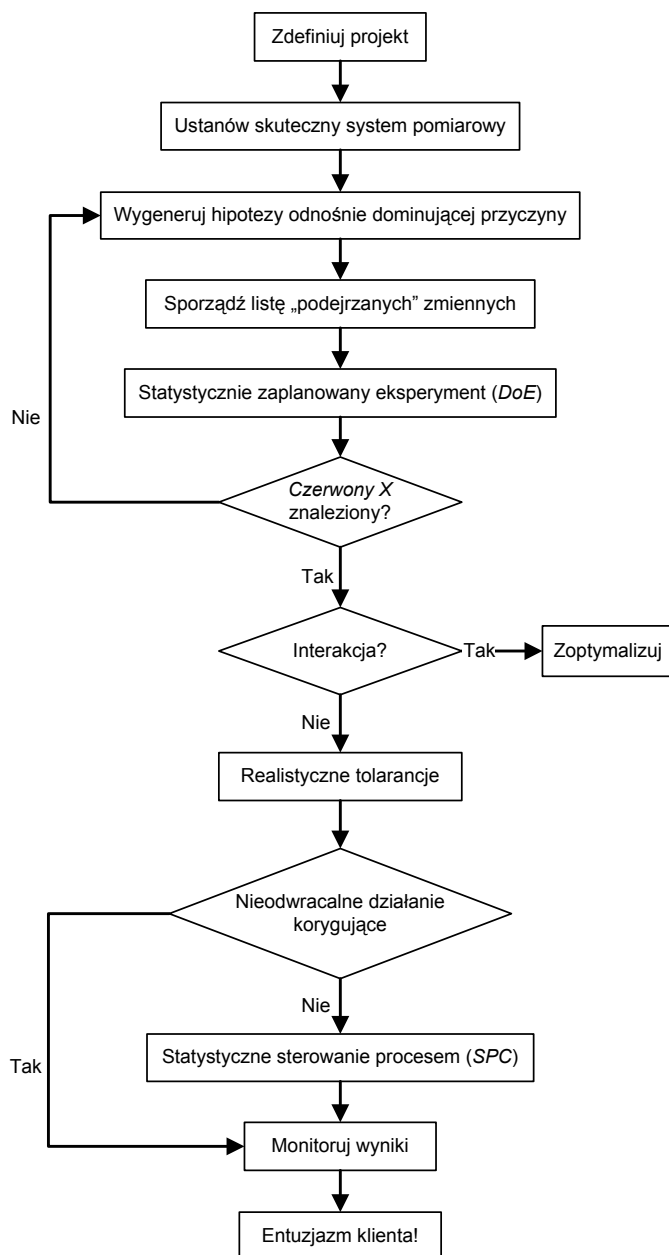


Rys.3.9. Algorytm przeznaczony do redukcji zmienności w procesach wytwórczych, według Steinera i MacKay’a

Źródło: na podstawie Steiner i MacKay, 2005, s.42

Odniesienie powyższego algorytmu do cyklu PDSA pozwala zauważyć, że przykładem on zdecydowanie największą wagę do etapu Planowania (*Plan*), w ramach którego mieści się jego pięć pierwszych kroków. Wszystkie działania związane z etapami: Wykonaj (*Do*), Studiuj (*Study*) i Działaj (*Act*) zawarte są natomiast w ostatnim kroku algorytmu, jakim jest: Walidacja rozwiązania i utrzymanie efektów. Powyższy model doskonalenia skupia się na etapie analizy problemu i bazuje na koncepcji Inżynierii Statystycznej (ang. *Statistical Engineering*). Koncepcja ta, opracowana przez Dorianą Shainina (Steiner *et al.*, 2008), opiera się na założeniu istnienia jednej lub dwóch dominujących przyczyn zmienności (nazywanych przez Shainina „czerwonymi X-ami”), do identyfikacji których wykorzystywane jest pojęcie rodzin zmienności oraz narzędzia i metody statystyczne, spośród których kluczową rolę w metodzie zaproponowanej przez Shainina odgrywa Planowanie eksperymentów (ang. *Design of Experiments*, DoE). Model doskonalenia jakości proponowany przez Shainina

(Rysunek 3.10) – tzw. System Shainina⁶ (ang. *The Shainin SystemTM*) – skupia się na zastosowaniu statystycznie zaplanowanych eksperymentów, w celu analizy procesu i identyfikacji dominującej przyczyny zmienności, marginalnie traktując pozostałe etapy pełnego cyklu doskonalenia, właściwe dla modelu PDSA.



Rys.3.10. System Shainina doskonalenia jakości

Źródło: na podstawie Steiner *et al.*, 2008, s.7

Należy zauważyć, że w koncepcji Inżynierii Statystycznej, na której bazuje również algorytm proponowany przez Steinera i MacKay'a, nie są rozróżniane przyczyny losowe i specjalne zmienności, ani nie mają zastosowania karty kontrolne. Zamiast tego, nacisk

⁶ System Shainina uznano tutaj za szczegółowy algorytm zastosowania metody DoE, nie będący jednak pełnym i uniwersalnym modelem doskonalenia, i dlatego nie został on umieszczony w zestawieniu zawartym w Tabeli 3.4.

kładziony jest na identyfikację dominującej przyczyny zmienności poprzez wykorzystanie idei rodzin zmienności.

Metodę doskonalenia procesów poprzez redukcję ich zmienności lub jej wpływu na wyniki organizacji proponuje Thornton (2004). Opracowana przez nią metoda nosi nazwę „Zarządzanie ryzykiem zmienności” (ang. *Variation Risk Management*, VRM) i składa się z trzech głównych etapów: Identyfikacji (ang. *Identification*), Oceny (ang. *Assessment*) oraz Łagodzenia (ang. *Mitigation*). Metodę tę cechuje wysoki poziom ogólności, szczególnie w odniesieniu do innych metod doskonalenia procesów ujętych w niniejszym zestawieniu. Główny nacisk położony jest tu na zadania wykonywane w ramach dwóch pierwszych kroków metody VRM, do których należy identyfikacja przepływu zmienności w procesach oraz analiza jej wpływu na kluczowe charakterystyki oraz na koszty, co prowadzi do identyfikacji obszarów związanych z największym ryzykiem/kosztami spowodowanym zmiennością. W tych obszarach, w ramach trzeciego i ostatniego etapu metody VRM, jakim jest „Łagodzenie”, podejmowane są następnie działania doskonalące, w formie jednej z pięciu proponowanych „strategii łagodzenia”, do których autorka zalicza (Thornton, 2004, s.137-138 i 151):

- 1) Zmiany w projekcie;
- 2) Zmiany w procesie produkcyjnym;
- 3) Udoskonalenia w procesie produkcyjnym, które mogą być przeprowadzone za pomocą takich przykładowych technik i narzędzi, jak:
 - Analiza procesu – za pomocą jego mapowania,
 - Analiza przyczyn źródłowych – przy wykorzystaniu takich technik jak wykres Ishikawy, czy FMEA,
 - Planowanie eksperymentów,
 - Regularne lub proaktywne utrzymanie maszyn,
 - Standardowe procedury operacyjne (ang. *Standard Operating Procedures*),
 - Poka-Yoke;
- 4) Monitorowanie procesu produkcyjnego;
- 5) Testowanie i inspekcje.

Thornton opisuje każdą z proponowanych strategii, nie określa jednak szczegółowego sposobu postępowania dotyczącego ich przeprowadzenia. Metoda VRM proponuje zatem spojrzenie na zmienność z poziomu całej organizacji w ogólnym kontekście, skupiając się na identyfikacji obszarów, w których należy przeprowadzić działania mające na celu redukcję zmienności procesu lub zmniejszenie jej wpływu na osiągnięte wyniki. W odniesieniu do cyklu PDSA można zauważyć, że proponowany przez Thornton model „Zarządzania ryzykiem zmienności” odnosi się w głównej mierze do etapu Planuj (*Plan*), bardzo pobieżnie traktując pozostałe trzy etapy PDSA.

3.3.4. Sposoby doskonalenia procesów – modele ukierunkowane na redukcję naturalnej zmienności procesu

W odróżnieniu od wyżej przedstawionych sposobów doskonalenia procesów, kolejna grupa algorytmów opiera się na rozróżnieniu losowych i specjalnych przyczyn zmienności procesu i zróżnicowaniu działań potrzebnych do ich identyfikacji i eliminacji.

Metoda nazywana „Praktycznym doskonaleniem procesu” (ang. *Practical Process Improvement*, PPI), proponowana przez amerykańskiego konsultanta R. Edwarda Zunicha

(Practical Process Improvement, 2008), opiera się na zastosowaniu kart kontrolnych (nazywanych tu *Process Behavior Charts* – czyli „kartami zachowania się procesu”) w celu odróżnienia zmienności naturalnej procesu od zmienności wynikającej z przyczyn specjalnych. Metoda składa się z ośmiu kroków, z których cztery pierwsze: Sformułowanie misji, Określenie aktualnego stanu procesu, Uproszczenie procesu, oraz Analiza danych, odpowiadają etapowi Planuj (*Plan*) cyklu PDSA. Kolejne dwa kroki, czyli Znalezienie i Testowanie rozwiązania, reprezentują etapy Wykonaj (*Do*) i Studiuj (*Study*), natomiast etap Działaj (*Act*) zawarty jest w krokach: Standaryzacja, oraz Plany na przyszłość.

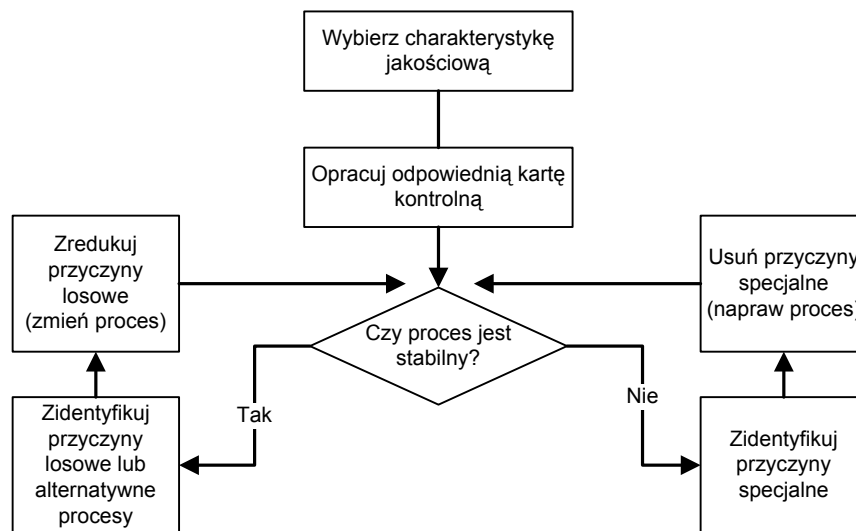
Nieco inny algorytm doskonalenia przedstawiany jest pod nazwą „Redukcja zmienności procesu” (ang. *Process Variability Reduction*, PVR). Jest to metoda składająca się z siedmiu kroków (Ertan, 1998; Mitchell, 1999; Quinlan, 1999), z których cztery pierwsze: Zdefiniowanie, Udokumentowanie, Pomiar i Analiza procesu, odzwierciedlają etap Planuj (*Plan*) cyklu PDSA. Etap Wykonaj (*Do*) ma swój odpowiednik w kroku Wdrożenia udoskonalenia, etap Studiuj (*Study*) – w Ewaluacji i walidacji udoskonalenia, a odpowiednikiem etapu Działaj (*Act*) jest Udokumentowanie udoskonalenia. Metoda przeznaczona jest do redukcji zmienności procesu wynikającej z przyczyn losowych, natomiast do likwidacji ewentualnych przyczyn specjalnych (jeżeli występują) przeznaczone jest działanie zawierające się w ramach kroku Analizy procesu – Stabilizacja procesu. Zatem metoda ta, zgodnie z zaleceniami Deminga (1994, s.338), wymaga usunięcia ewentualnych przyczyn specjalnych zmienności przed przystąpieniem do redukcji naturalnej zmienności procesu.

Kolejnym sposobem doskonalenia, jaki można zaliczyć do tej grupy, jest zaproponowany przez Jurana „Model Przełomowego Doskonalenia” (ang. *The Juran Model of Breakthrough Improvement*), przeznaczony do rozwiązywania tzw. chronicznych problemów (DeFeo i Barnard, 2004, s.35). Jak wspomniano wcześniej, Juran rozróżniał problemy chroniczne, zwykle związane z losowymi przyczynami zmienności, od tzw. problemów sporadycznych, zwykle wynikających z działania przyczyn specjalnych. W przypadku problemów sporadycznych Juran zalecał stosowanie Sterowania jakością, natomiast do pokonywania problemów chronicznych służyć ma Doskonalenie jakości, nazywane też Przełomowym doskonaleniem. Pierwsze pięć kroków proponowanego przez Jurana modelu Przełomowego doskonalenia, czyli: Identyfikacja problemu, Ustanowienie projektu, Analiza objawów, Generowanie i testowanie teorii dotyczących prawdopodobnych przyczyn przeanalizowanych objawów, oraz Identyfikacja przyczyn źródłowych, dość szczegółowo odzwierciedla etap Planuj (*Plan*) cyklu PDSA. Etapy Wykonaj (*Do*) oraz Studiuj (*Study*) zawarte są w kroku: Opracowanie udoskonalień. Natomiast etap Działaj (*Act*) podzielony jest na kroki: Ustanowienie nowych kontroli, Przewyciężenie oporu przed zmianą i Powielenie wyników.

Rozróżnienie przyczyn losowych i specjalnych zmienności procesów ma miejsce także w ramach modelu doskonalenia o nazwie RISE, proponowanego przez brytyjską firmę konsultingową *wdp consulting* (*wdp consulting*, 2007). Nazwa tego modelu, opisywanego jako metoda służąca do doskonalenia procesów, pochodzi od pierwszych liter angielskich nazw jego czterech etapów: *Recognition* (pol. Rozpoznanie), *Investigation* (pol. Badanie), *Solution* (pol. Rozwiązanie) i *Evaluation* (pol. Ewaluacja). Dwa pierwsze z tych kroków odpowiadają etapowi Planuj (*Plan*) cyklu PDSA, a dwa ostatnie – etapom Wykonaj (*Do*), Studiuj (*Study*) i Działaj (*Act*). W ramach etapu drugiego – Badanie – zawarto działanie polegające na ewentualnej stabilizacji procesu, w razie wykrycia działania na proces specjalnych przyczyn zmienności, przed przystąpieniem do dalszych etapów doskonalenia.

Inna, amerykańska, firma konsultingowa proponuje nieco odmienny model, nazywany „Strategią doskonalenia jakości” (ang. *Quality Improvement Strategy*, QIS), również składający się z czterech podstawowych kroków (The ROI Alliance, Llc, 2008). Trzy pierwsze z nich: Pomiar (ang. *Measure*), Sterowanie (ang. *Control*) i Dostosowanie (ang. *Conform*) obejmują działania odpowiadające etapowi Planuj (*Plan*) cyklu PDSA. Przy tym, krok Sterowania (ang. *Control*) jest poświęcony ocenie stabilności procesu i ewentualnej jego stabilizacji, a więc uwzględnia on konieczność usunięcia ewentualnych przyczyn specjalnych zmienności procesu. Ostatni krok tej strategii: Doskonalenie (ang. *Improve*), obejmuje wszystkie działania zawierające się w pozostałych trzech etapach cyklu PDSA.

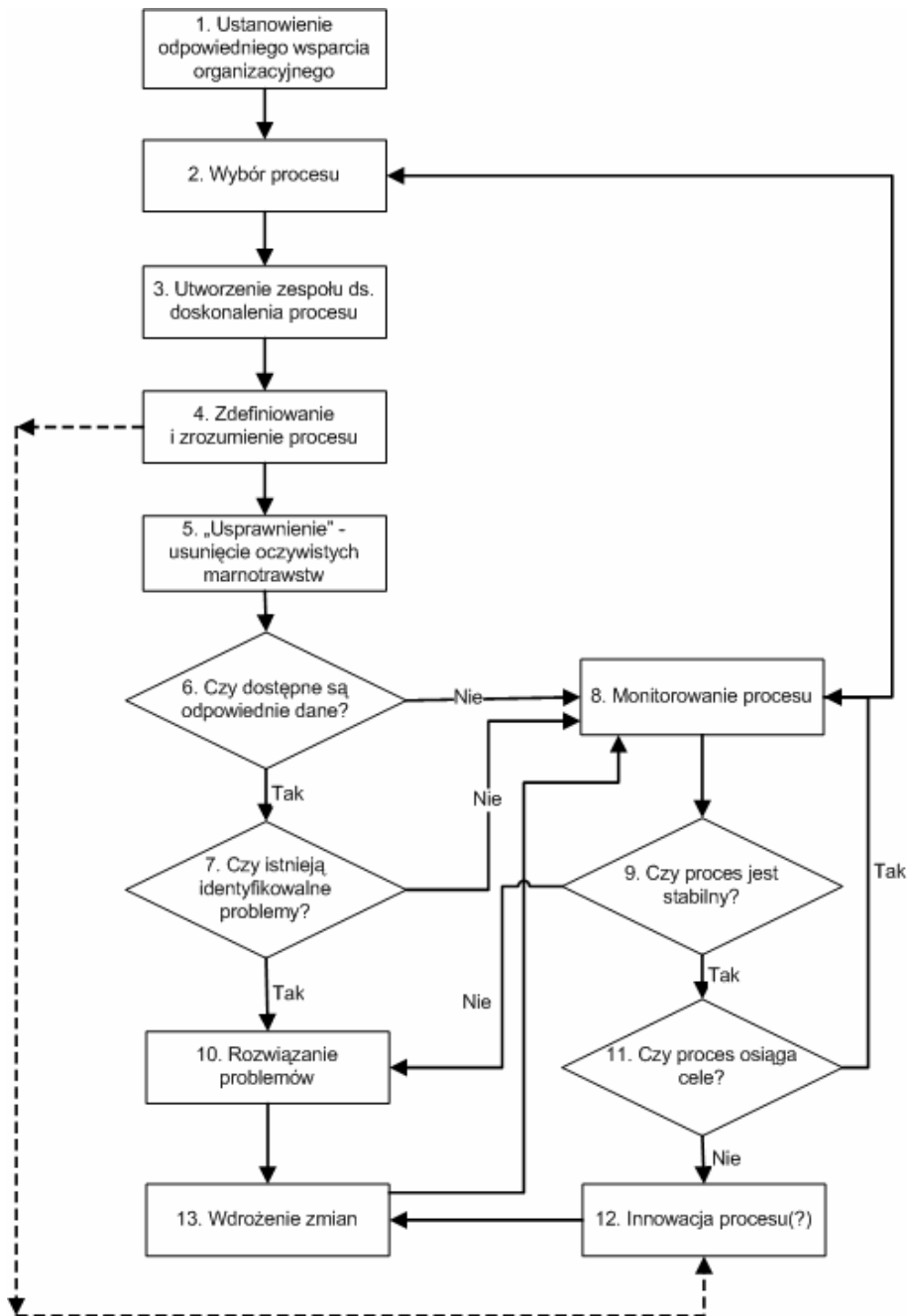
Pozostałe dwa modele doskonalenia także opierają się na rozróżnieniu losowych i specjalnych przyczyn zmienności procesu, a ponadto zawierają oddzielne ścieżki działania przeznaczone do celów redukcji zmienności związanej z każdym z tych dwóch rodzajów przyczyn. Takie podejście wynika z pełnego uwzględnienia dwóch możliwych stanów, w jakich może znajdować się proces: stabilności (braku oddziaływania specjalnych przyczyn zmienności) lub jej braku (z powodu oddziałujących na proces specjalnych przyczyn zmienności). Podejście takie w ogólny sposób przedstawili Nolan i Provost (1990), ukazując dwie różne ścieżki postępowania w procesie doskonalenia (Rysunek 3.11).



Rys.3.11. Przebieg doskonalenia procesu z uwzględnieniem rodzajów zmienności, według Nolana i Provosta

Źródło: na podstawie Nolan i Provost, 1990, s.77

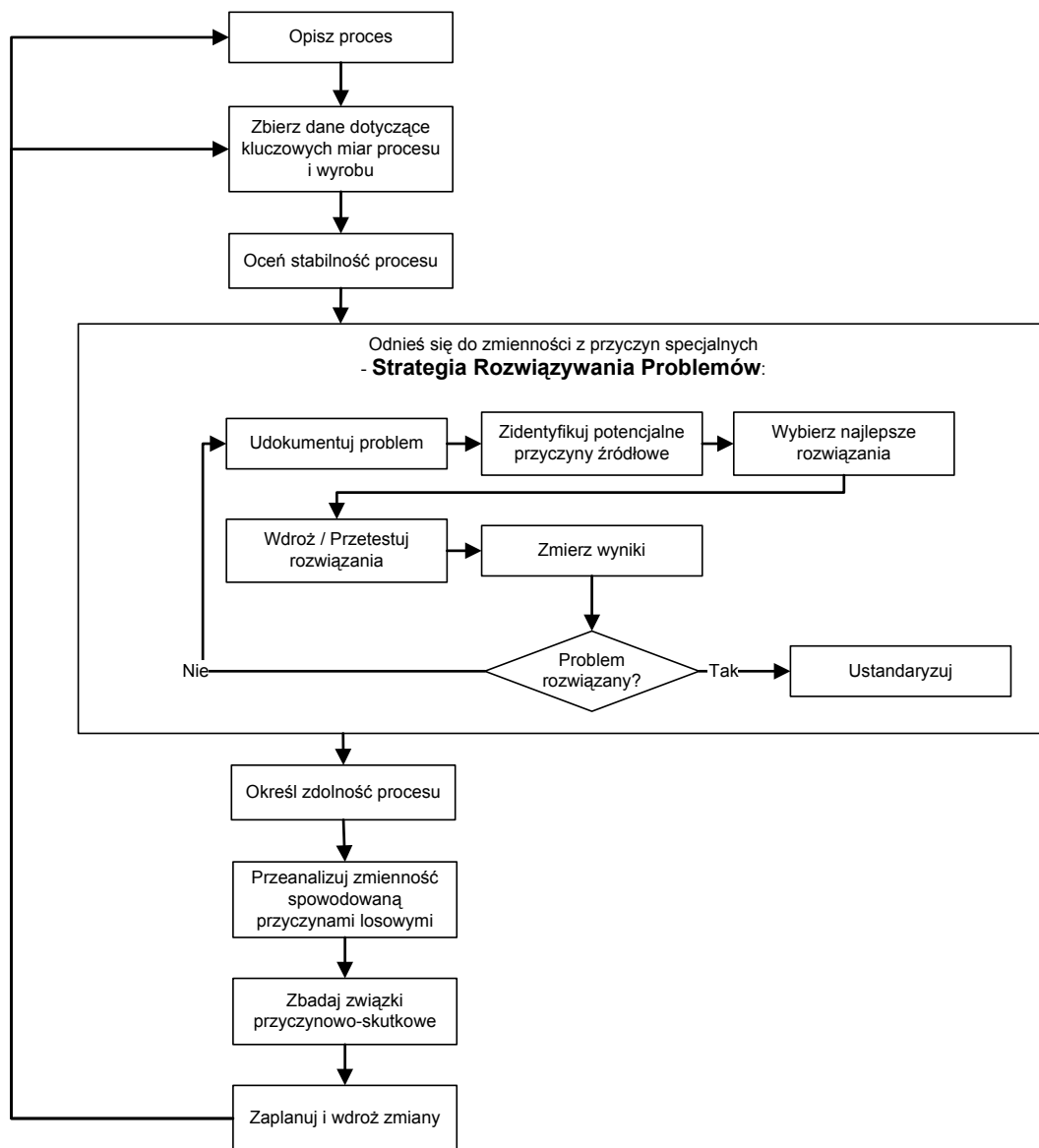
Rohleder i Silver (1997) uszczegóławiają powyższe podejście, proponując „Model Doskonalenia procesu” (ang. *Process Improvement Framework*). W ramach tego modelu (Rysunek 3.12), etap Planuj (*Plan*) cyklu PDSA ujęty jest w krokach: Wybór, zdefiniowanie i zrozumienie procesu, Usunięcie oczywistego marnotrawstwa, Monitorowanie procesu, a także Ocena stabilności procesu, po której – w zależności od wyniku oceny – następuje Rozwiązanie problemów (jeśli proces jest niestabilny) lub Innowacja procesu (w przypadku procesu stabilnego). Ostatni krok modelu: Wdrożenie zmian, odpowiada pozostałym trzem etapom cyklu PDSA.



Rys.3.12. Model Doskonalenia procesu, według Rohledera i Silvera

Źródło: na podstawie Rohleder i Silver, 1997, s.141

W nieco inny sposób dwa podstawowe rodzaje zmienności uwzględniają w proponowanej przez siebie metodzie Britz *et al.* (2000). Bazując na koncepcji Myślenia Statystycznego, przedstawiają oni „Strategię Doskonalenia procesu” (ang. *The Process Improvement Strategy*), w ramach której jeden z etapów może zostać w razie potrzeby rozwinięty w formie „Strategii Rozwiązywania Problemów” (ang. *The Problem Solving Strategy*). Na Rysunku 3.13 przedstawiono model proponowany przez Britz *et al.*, łączący obie strategie.



Rys.3.13. Strategia Doskonalenia procesu uwzględniająca Strategię Rozwiązywania Problemów, według Britz *et al.*

Źródło: opracowanie na podstawie Britz *et al.*, 2000, s.83 i s.99

Podobnie jak w przypadku modelu Rohledera i Silvera, w strategii tej większość kroków odpowiada etapowi Planuj (*Plan*) cyklu PDSA: począwszy od Opisu procesu, przez Zebranie danych, Ocenę stabilności procesu i ewentualne przejście do jego ustabilizowania, następnie Określenie zdolności procesu i Analizę jego naturalnej zmienności, aż po Zbadanie zachodzących w procesie związków przyczynowo-skutkowych. Ostatni krok strategii: Zaplanowanie i wdrożenie zmian, obejmuje natomiast wszystkie działania zawarte w pozostałych trzech etapach cyklu PDSA.

3.3.5. Sposoby doskonalenia procesów – podsumowanie

Podsumowując, należy zauważyć że:

- Istnieje wiele różnych modeli umożliwiających doskonalenie procesów, zarówno ogólnych, jak i bardziej szczegółowych, które opracowywane i opisywane są przez uznanych specjalistów z dziedziny Zarządzania Jakością, jak i oferowane przez firmy konsultingowe i szkoleniowe.
- Proponowane sposoby doskonalenia procesów składają się z etapów, które mogą być odniesione do etapów uniwersalnego cyklu doskonalenia PDSA.
- W różnych algorytmach doskonalenia poszczególne etapy cyklu PDSA są w różnym stopniu uszczegółowione.
- Uniwersalne modele doskonalenia, w których nie rozróżnia się przyczyn losowych zmienności od przyczyn specjalnych, zazwyczaj pobieżnie traktują etap analizy szeroko rozumianego problemu, w ramach którego dokonywana jest identyfikacja przyczyn – nie wskazując w jaki dokładnie sposób taka analiza powinna przebiegać.
- Modele doskonalenia procesów, które są wyraźnie ukierunkowane na redukcję zmienności naturalnej, zwykle są bardziej szczegółowe i nieco dokładniej omawiają działania związane z identyfikacją przyczyn problemu, które w dużej mierze bazują na omówionej w Rozdziale 3.1.3 koncepcji czynnika dominującego.
- W modelach doskonalenia, które są ukierunkowane na redukcję zmienności naturalnej procesów, z reguły na etapie analizy problemu uwzględniane jest działanie, którego celem jest sprawdzenie, czy na proces oddziałują przyczyny specjalne zmienności. W razie ich wykrycia, przed przystąpieniem do dalszych działań mających na celu doskonalenie procesu, zalecana jest tzw. „stabilizacja procesu”, poprzez wyeliminowanie przyczyn specjalnych zmienności. Jest to zgodne z zalecanym sposobem postępowania, omówionym w Rozdziale 3.1.2.
- W ramach większości z omówionych modeli doskonalenia, w odniesieniu do każdego etapu działania proponowany jest pewien zbiór metod i narzędzi przydatnych do jego realizacji. Nie znaleziono jednak modelu, w ramach którego przedstawiony byłby jednoznaczny, szczegółowy algorytm postępowania odnośnie odpowiedniego zastosowania tych metod i narzędzi.

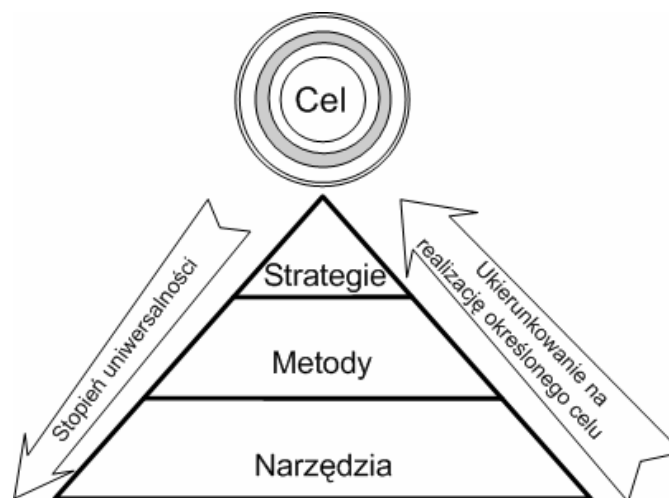
3.4. Metody, techniki i narzędzia wykorzystywane do redukcji zmienności procesów

Realizacja procesu doskonalenia odbywa się poprzez zastosowanie wybranych spośród wielu dostępnych metod, technik i narzędzi. Są one w znacznej mierze wspólne dla większości podejść do doskonalenia procesów, a przeważająca część z nich to metody, techniki i narzędzia funkcjonujące od wielu lat w ramach Zarządzania Jakością.

3.4.1. Metody, techniki, narzędzia – terminologia

Stosowane nazewnictwo: metoda, technika, narzędzie, wydaje się nie być do końca konsekwentne i w pełni zdefiniowane. Określenia te bywają używane zamiennie dla tych samych metod/technik/narzędzi, nawet przez jednego autora (np. Pyzdek, 2001). Spośród tych trzech określeń słowo „technika” wydaje się być stosowane stosunkowo najmniej

powszechnie i przede wszystkim funkcjonuje jako równorzędne z określeniem „metoda” – np. sposoby postępowania nazywane przez Feigenbauma (1991, s.278) czy Dooley’a *et al.* (2000, s.210) technikami, przez innych autorów określane są jako metody. W Raporcie Technicznym PKN-ISO/TR 10017:2005, zawierającym wytyczne odnośnie stosowania technik statystycznych w kontekście ISO 9001:2000, określenia „techniki statystyczne” i „metody statystyczne” są często używane zamiennie, co wyraźnie zastrzeżono (Polski Komitet Normalizacyjny, 2005). Z kolei Gardner (2001, s.58) oddziela techniki od metod, traktując je jednocześnie jako nieco bardziej złożone od narzędzi. Na ogół, zarówno metoda, jak i technika są postrzegane jako bardziej skomplikowane od narzędzia, które jest z reguły względnie proste. Ponadto, każda z metod czy technik może zawierać w sobie zbiór narzędzi, które w jej ramach wykorzystywane są do realizacji określonego celu. Same narzędzia są uniwersalne i dopiero w kontekście danego celu i w ramach odpowiedniej metody czy techniki zostają ukierunkowane na realizację konkretnego zadania. Jak trafnie zauważa Hamrol (2007, s.362), nazwy „metoda” i „narzędzie” [a także „technika”] są często stosowane zamiennie, a sama kwestia nazewnictwa jest dyskusyjna. Wobec tego zaleca on uznanie jej za sprawę umowną, pozostając przy ogólnej regule o wyższym stopniu złożoności metod w stosunku do narzędzi. Podobne podejście prezentuje Gardner, wyróżniając kolejno według rosnącego stopnia złożoności: narzędzia i techniki, metody, oraz strategie doskonalenia procesów (Gardner, 2001, s.58). Powyższe podejście zastosowano w niniejszej pracy, uznając narzędzia za elementy różnego rodzaju metod (lub technik), których zastosowanie w ramach przyjętej strategii (podejścia, algorytmu, sposobu postępowania) prowadzi do osiągnięcia założonego celu. Zależność pomiędzy narzędziami, metodami i strategiami doskonalenia w sposób schematyczny przedstawiono na Rysunku 3.14.



Rys.3.14. Schemat zależności pomiędzy strategiami, metodami i narzędziami doskonalenia jakości

Źródło: opracowanie własne

3.4.2. Dobór metod, technik i narzędzi doskonalenia

Ponieważ zbiór dostępnych metod, technik i narzędzi doskonalenia jest bardzo szeroki, przy realizacji działań doskonalących ważny jest wybór odpowiednich metod do realizacji określonych celów. Istotność dokonania właściwego wyboru jest często podkreślana (Parsons, 1992; Componation i Farrington, 2000; Dolan, 2003, s.27), co wynika z faktu, że nie każde narzędzie jest odpowiednie do zastosowania w ramach każdego projektu doskonalącego.

Wybór i zastosowanie nieodpowiedniego narzędzia, prowadzące do nie osiągnięcia pożądanego rezultatu działania doskonalącego, może doprowadzić do dezorientacji i frustracji, a w efekcie do zniechęcenia i zaniechania prowadzonych działań, a nawet do zaprzestania stosowania danego narzędzia w przyszłych projektach doskonalących (Parsons, 1992, s.29). Podobne skutki może przynieść niepoprawne stosowanie metod i narzędzi, wynikające z ich niedostatecznej znajomości. Jak zauważa McManus (1999), błędne stosowanie narzędzi doskonalenia jakości może prowadzić do tak poważnych konsekwencji jak marnowanie czasu, niszczenie morale pracowników i umniejszanie wiarygodności liderów. Zaznacza on również, że w praktyce często wybór ogranicza się wyłącznie do tych narzędzi, które w minionych działaniach doskonalących były z sukcesem stosowane. Może to grozić sytuacją, w której każdy problem będzie dopasowywany do „sprawdzonego” narzędzia. Taką prawidłowość zauważa także Gardner (2001, s.52), cytując maksymę Masłowa: „Człowiek, który dysponuje tylko młotkiem, traktuje wszystko, jakby było gwoździem”. Podkreśla on jednocześnie, że skuteczne doskonalenie procesów nie jest możliwe przy użyciu tylko jednego narzędzia, ale wymaga „skrzynki z narzędziami”. Na niebezpieczeństwo popadnięcia w rutynę (rozumianego jako trzymanie się jednej sprawdzonej ścieżki doskonalenia bez względu na okoliczności) w odniesieniu do działań doskonalących, zwracają uwagę także Upton i Kim (1998, s.17-18), zauważając, że takie postępowanie może ograniczyć rozwój całej organizacji. Stwierdzają oni, że w praktyce często realizowanie działań doskonalących za pomocą danej (znanej i sprawdzonej) metody determinuje wybór przyszłych technik doskonalenia.

Pomimo podkreślania istotności właściwego doboru odpowiednich metod i narzędzi doskonalenia, w większości opracowań dotyczących podejść do doskonalenia procesów autorzy skupiają się na ogólnym sposobie postępowania. Jednocześnie, metody, techniki i narzędzia służące do rzeczywistej realizacji procesu doskonalenia prezentowane są jako zbiór, z którego użytkownik na każdym etapie działania powinien wybrać to, co w danej sytuacji uzna za odpowiednie. Niestety, w większości przypadków brak jest jednoznacznych wskazówek, jak dokonać takiego wyboru. Podkreślana jest natomiast, niezbędna do jego dokonania, konieczność zrozumienia samych narzędzi, a także warunków ich skuteczności (Snee i Hoerl, 2003, s.192). Takie zrozumienie wymaga uprzedniego zapoznania się z całym zbiorem metod i narzędzi, który często jest bardzo liczny, a niektóre z jego elementów – bardzo skomplikowane, co czyni to zadanie trudnym i czasochłonnym.

3.4.3. Klasyfikacje metod, technik i narzędzi doskonalenia – stosowane kryteria podziału

Wybór odpowiedniej metody, techniki czy narzędzia doskonalenia procesów mogą ułatwić ich klasyfikacje, prezentowane w literaturze, które uwzględniają różnego rodzaju kryteria. W Tabeli 3.5 zawarto najczęściej stosowane kryteria klasyfikacji metod, technik i narzędzi doskonalenia procesów, które omówiono poniżej.

Tabela 3.5. Stosowane kryteria podziału metod, technik i narzędzi doskonalenia procesów

Kryterium	Proponowany podział	Źródło
Typ zmienności procesu	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Narzędzia stosowane w ramach Strategii doskonalenia procesów – do redukcji zmienności procesów spowodowanej przyczynami losowymi ▪ Narzędzia stosowane w ramach Strategii rozwiązywania problemów – do identyfikacji i usuwania przyczyn specjalnych zmienności procesów 	(Britz <i>et al.</i> , 2000, s.83 i s.99)

Chronologia – kolejność stosowania grup metod / narzędzi przypadających na zdefiniowane etapy sposobu postępowania	<ul style="list-style-type: none"> ▪ PDSA: narzędzia wykorzystywane na kolejnych etapach cyklu PDSA 	(Scherkenbach, 1991, s.137)
	<ul style="list-style-type: none"> ▪ PDCA: narzędzia wykorzystywane na kolejnych etapach cyklu PDCA 	(Łańcucki, 2006, s.269) (Łuczak i Matuszak-Flejszman, 2007)
	<ul style="list-style-type: none"> ▪ DMAIC: narzędzia zalecane do stosowania na etapach: Define, Measure, Analyze, Improve i Control 	(Bertels, 2003) (Snee i Hoerl, 2003, s.194) (De Koning i De Mast, 2006, s.782-783)
	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Strategia doskonalenia procesu i Strategia rozwiązywania problemu: narzędzia zalecane do stosowania na kolejnych etapach obu strategii 	(Britz <i>et al.</i> , 2000, s.83 i s.99)
	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Narzędzia mające zastosowanie w ramach 10 kolejnych kroków ogólnego procesu doskonalenia jakości 	(Tague, 2005)
Cel zastosowania	<p>Techniki służące do:</p> <ul style="list-style-type: none"> ▪ Planowania jakości ▪ Sterowania jakością ▪ Doskonalenia jakości 	(Dooley <i>et al.</i> , 2000, s.210)
	<p>Narzędzia służące do:</p> <ul style="list-style-type: none"> ▪ Opisu procesu ▪ Badania procesu ▪ Monitorowania procesu 	(Parsons, 1992, s.30)
	<p>Narzędzia służące do:</p> <ul style="list-style-type: none"> ▪ Rozwiązywania problemów ▪ Zarządzania i planowania działań doskonalących ▪ Prezentacji danych 	(Pyzdek, 2001)
	<p>Metody statystyczne służące do:</p> <ul style="list-style-type: none"> ▪ Opisu stanu obecnego procesu ▪ Przewidywania stanu przyszłego procesu 	(Pyzdek, 2001)
	<p>Narzędzia mające na celu:</p> <ul style="list-style-type: none"> ▪ Poszerzanie obszaru badań ▪ Zawężanie obszaru badań 	(Tague, 2005)
	<p>Techniki służące do:</p> <ul style="list-style-type: none"> ▪ Określenia zdolności ▪ Określenia stopnia zgodności z planowanymi wartościami ▪ Określenia źródła zmienności ▪ Identyfikacji przyczyn niezgodności 	(Feigenbaum, 1991, s.278)
	<p>Narzędzia służące do:</p> <ul style="list-style-type: none"> ▪ Analizy danych ▪ Analizy procesu 	(Hsieh <i>et al.</i> , 2007, s.5)

	<p>Narzędzia służące do:</p> <ul style="list-style-type: none"> ▪ Standaryzacji ▪ Eliminacji defektów ▪ Zarządzania zmiennością ▪ Redukcji marnotrawstwa ▪ Adaptacji 	(Gardner, 2001, s.58)
	<p>Narzędzia służące do:</p> <ul style="list-style-type: none"> ▪ Kojarzenia i grupowania ▪ Planowania działań ▪ Opisu ilościowego ▪ Opisu właściwości statystycznych 	(Hamrol, 2007, s.287)
	<p>Narzędzia elementarne, służące do:</p> <ul style="list-style-type: none"> ▪ Wykrywania błędów ▪ Analizy błędów 	(Hamrol, 2007, s.285)
	<p>Narzędzia nowe, służące do:</p> <ul style="list-style-type: none"> ▪ Analizy problemu ▪ Podejmowania decyzji o działaniach ▪ Planowania kolejności działań i zasobów 	(Hamrol, 2007, s.286)
	<p>Narzędzia statystyczne, służące do:</p> <ul style="list-style-type: none"> ▪ Zbierania danych ▪ Szacowania parametrów populacji ▪ Wnioskowania 	(Hamrol, 2007, s.287)
	<p>Narzędzia służące do:</p> <ul style="list-style-type: none"> ▪ Planowania i wdrożenia projektu ▪ Generowania pomysłów ▪ Analizy procesu ▪ Zbierania danych i ich analizy ▪ Analizy przyczyn ▪ Oceny i podejmowania decyzji 	(Tague, 2005)
	<p>Metody i techniki, odnoszące się do:</p> <ul style="list-style-type: none"> ▪ Kreowania pomysłów ▪ Opisu i analizy ▪ Identyfikacji zagrożeń i problemów ▪ Identyfikacji i analizy przyczyn ▪ Identyfikacji i wyboru rozwiązań ▪ Realizacji i oceny skuteczności ▪ Know-how 	(Łuczak i Matuszak-Flejszman, 2007)
Rodzaj metod / narzędzi	<p>Metody i narzędzia:</p> <ul style="list-style-type: none"> ▪ Statystyczne ▪ Nie-statystyczne 	(Voelkel, 2002, s.98)
	<p>Narzędzia:</p> <ul style="list-style-type: none"> ▪ Podstawowe ▪ Statystyczne 	(Practical Process Improvement, 2008)
	<p>Narzędzia:</p> <ul style="list-style-type: none"> ▪ Elementarne 	(Hamrol, 2007, s.284)

	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Nowe ▪ Statystyczne 	
Poziom zaawansowania metod / narzędzi	Metody: <ul style="list-style-type: none"> ▪ Podstawowe ▪ Średnio-zaawansowane ▪ Zaawansowane 	(Pyzdek, 2001)
	Metody i narzędzia: <ul style="list-style-type: none"> ▪ Specjalistyczne ▪ Nie-specjalistyczne 	(Voelkel, 2002, s.98)
Rodzaj analizowanych danych	Metody diagnozy służące do analizy wad, wyrażonych w postaci: <ul style="list-style-type: none"> ▪ Cech podzielnych – liczbowych ▪ Cech podzielnych – alternatywnych ▪ Cech niepodzielnych 	(Juran i Gryna, 1974, s.643)
	Narzędzia służące do analizy danych: <ul style="list-style-type: none"> ▪ Ilościowych lub jakościowych ▪ Ciągłych lub dyskretnych ▪ Normalnych lub nie-normalnych 	(Perry i Barker, 2006)
Stopień trudności problemu / skomplikowania procesu	Narzędzia zalecane do procesów/problemów: <ul style="list-style-type: none"> ▪ Mniej skomplikowanych ▪ Bardziej skomplikowanych 	(Schneiderman, 1998)
Efektywność	Metody przynoszące: <ul style="list-style-type: none"> ▪ Trwały wpływ na poprawę jakości ▪ Szybkie efekty jakościowe ▪ Motywację do pracy zespołowej Metody wymagające: <ul style="list-style-type: none"> ▪ Dodatkowych kosztów ▪ Dodatkowych kwalifikacji ▪ Dodatkowego czasu 	(Hamrol, 2007, s.363)
Ewentualna ingerencja w badany proces	Narzędzia służące do: <ul style="list-style-type: none"> ▪ Analizy pasywnej ▪ Analizy proaktywnej 	(Breyfogle i Meadows, 2001, s.103)
Obszar stosowania	Narzędzia zalecane do doskonalenia w obszarze: <ul style="list-style-type: none"> ▪ Projektowania i rozwoju ▪ Zakupów ▪ Produkcji i dostarczania usługi ▪ Nadzorowania wyposażenia do monitorowania i pomiarów 	(Polski Komitet Normalizacyjny, 2005, s.13-21)

Źródło: opracowanie własne

Najprostszym sposobem klasyfikacji narzędzi doskonalenia jest przypisanie grup narzędzi poszczególnym krokom stosowanego algorytmu doskonalenia. Dzięki takiej klasyfikacji użytkownik na każdym etapie działania ma do wyboru pewien ograniczony zbiór narzędzi. Taką klasyfikację prezentuje Scherkenbach (1991, s.137), przyporządkowując techniki i narzędzia do kolejnych etapów ogólnego cyklu doskonalenia PDSA. Z kolei np. Łańcucki (2006, s.269), czy też Łuczak i Matuszak-Flejszman (2007) przedstawiają

narzędzia wykorzystywane w ramach kolejnych czterech etapów cyklu PDCA. W podobny sposób podchodzi się do metod i narzędzi stosowanych w ramach algorytmu DMAIC w strategii Six Sigma. Autorzy opracowań dotyczących Six Sigma, tacy jak np. Bertels (2003), czy Snee i Hoerl (2003, s.194), przedstawiają metody i narzędzia zalecane do stosowania w ramach kolejnych etapów algorytmu DMAIC. Podejście do strategii Six Sigma, bardzo popularnej i szeroko opisywanej w ostatnich latach, nieco różni się w ujęciu różnych autorów, co dotyczy również zalecanych narzędzi. Różnice te dostrzegli i zestawili De Koning i De Mast (2006) w swojej pracy przedstawiającej przegląd podejść do strategii Six Sigma. Prezentują oni m.in. zestawienie narzędzi, jakich zastosowanie najczęściej zaleca się w ramach poszczególnych etapów algorytmu DMAIC (De Koning i De Mast, 2006, s.782-783). Przypisanie grup przykładowych zalecanych narzędzi do kolejnych kroków postępowania stosują także Britz *et al.* (2000) w przedstawianych Strategiach: Doskonalenia procesu i Rozwiązywania problemu, a także Tague (2005), przyporządkowując poszczególne narzędzia odpowiednim z dziesięciu wyróżnionych kroków ogólnego procesu doskonalenia jakości.

Innym, bardzo często stosowanym sposobem klasyfikacji metod i narzędzi wykorzystywanych w ramach procesu doskonalenia, jest ich podział ze względu na cel zastosowania. Najogólniejszym podziałem tego typu jest podział ze względu na to, czy celem jest redukcja zmienności wynikającej z przyczyn losowych czy z przyczyn specjalnych. Podział taki stosują np. Britz *et al.* (2000), proponując do każdego z tych celów inny algorytm, w ramach którego zalecają nieco inne zestawy metod i narzędzi. Klasyfikacja ta jest zgodna z obserwacją Juran i Gryny (1974, s.30), że analiza potrzebna do eliminacji wad sporadycznych (z reguły związanych ze specjalnymi przyczynami zmienności) jest „zwykle prosta” i wymaga innych metod i narzędzi niż „często zawiła” analiza, jaką trzeba przeprowadzić w przypadku działań zmierzających do eliminacji wad chronicznych (związanych z losowymi przyczynami zmienności).

Z kolei Dooley *et al.* (2000, s.210) wyróżniają – za Juranem – trzy podstawowe zadania zarządzania jakością: planowanie jakości, sterowanie jakością i doskonalenie jakości, i wymieniają przykładowe techniki, mające zastosowanie w realizacji każdego z nich. Bardziej szczegółową klasyfikację narzędzi doskonalenia ze względu na realizowany cel proponuje Parsons (1992, s.30), dzieląc podstawowe narzędzia doskonalenia na trzy grupy: narzędzia do opisu procesu, badania procesu i monitorowania procesu. Pyzdek (2001), opisując metody i narzędzia stosowane w ramach strategii Six Sigma, proponuje kilka sposobów ich klasyfikacji. Podstawowe narzędzia Pyzdek dzieli ze względu na cel zastosowania, jakim może być: rozwiązywanie problemów, zarządzanie i planowanie działań doskonalących, lub prezentacja danych. Natomiast metody statystyczne dzieli na dwie grupy: metody służące do opisu stanu obecnego procesu (ang. *Enumerative study*), oraz metody służące do analizy i przewidywania stanu przyszłego procesu (ang. *Analytic study*), zgodnie z rozróżnieniem dokonany przez Deminga (1994, s.182). Ogólny cel zastosowania narzędzi doskonalenia jest również kryterium użytym przez Tague (2005), która wyróżnia narzędzia wykorzystywane do poszerzania, lub też zawężania obszaru badań, a także – w ujęciu bardziej szczegółowym – narzędzia służące do: planowania i wdrożenia projektu, generowania pomysłów, analizy procesu, zbierania danych i ich analizy, analizy przyczyn, lub też do oceny i podejmowania decyzji. Celem, jaki ma zostać zrealizowany poprzez zastosowanie danego narzędzia, kieruje się także Feigenbaum (1991, s.278), dzieląc techniki analizy jakości procesu na grupy służące do: określenia zdolności (procesu, maszyny, wyposażenia), określenia stopnia zgodności z planowanymi wartościami, określenia źródła zmienności (procesu, oddziaływania jakość-koszt), oraz do identyfikacji przyczyn niezgodności. Z kolei Hsieh *et al.* (2007, s.5), omawiając etap Analize (Przeanalizuj) algorytmu DMAIC, dzielą

zalecane narzędzia na dwie grupy, w zależności od tego czy mają one służyć do „analizy danych” (a więc wyciągania wniosków na podstawie przeprowadzonych pomiarów), czy też do „analizy procesu” (czyli wyciągania wniosków na podstawie obserwacji funkcjonowania badanego procesu). Jeszcze inny podział narzędzi, technik i metod proponuje Gardner (2001, s.58), przyporządkowując je do następujących strategii: standaryzacja, eliminacja defektów (rozumiana tu jako eliminowanie specjalnych przyczyn zmienności), zarządzanie zmiennością (czyli postępowanie ze zmiennością procesu wynikającą z przyczyn losowych), redukcję marnotrawstwa, oraz adaptację (czyli wdrażanie zmian). Celem zastosowania kieruje się również Hamrol (2007), który omawiając narzędzia stosowane w ramach Zarządzania Jakością proponuje kilka klasyfikacji uwzględniających bezpośrednie zadania stawiane przed poszczególnymi grupami narzędzi (Hamrol, 2007, s.285-287), a także ich ogólne przeznaczenie, rozumiane jako: kojarzenie i grupowanie, planowanie działań, opis ilościowy, bądź też opis właściwości statystycznych (Hamrol, 2007, s.287). Natomiast Łuczak i Matuszak-Flejszman (2007) w proponowanym zestawieniu klasyfikują metody i techniki odnosząc je do siedmiu elementów Zarządzania Jakością określonych w kontekście podejścia procesowego.

Innym sposobem podziału narzędzi doskonalenia jest rozróżnienie ze względu na ogólnie rozumiany rodzaj narzędzi, który zwykle dotyczy przede wszystkim odróżnienia narzędzi statystycznych, które w algorytmach doskonalenia procesów znajdują szerokie zastosowanie, od pozostałych narzędzi. Taką prostą klasyfikację stosują m.in.: Voelkel (2002, s.98), który oddziela metody i narzędzia statystyczne od nie-statystycznych, R. Edward Zunic, oferujący metodę doskonalenia o nazwie Practical Process Improvement (2008), która dzieli narzędzia na podstawowe i statystyczne, a także Hamrol (2007, s.284), który wyróżnia narzędzia elementarne, nowe i statystyczne.

Nieco inna klasyfikacja uwzględnia podział metod i narzędzi doskonalenia ze względu na ich poziom zaawansowania. Taką klasyfikację proponuje Pyzdek (2001), wyróżniając metody: podstawowe, średnio-zaawansowane i zaawansowane, a także Voelkel (2002, s.98), dzieląc metody i narzędzia doskonalenia na: specjalistyczne i nie-specjalistyczne.

Innym kryterium, według którego może zostać dokonany podział metod i narzędzi doskonalenia, a które zarazem może być ważną wskazówką przy wyborze odpowiedniego narzędzia, jest rodzaj danych, jakie mają zostać przeanalizowane przy ich wykorzystaniu. Takim kryterium kierują się Juran i Gryna (1974, s.643), którzy przedstawiają propozycje metod służących do analizy wad, dzieląc je na trzy grupy w zależności od tego, w jaki sposób mierzona jest wada. Wyróżniają oni tzw. cechy podzielne – takie, które mogą być mierzone pomiędzy poszczególnymi operacjami, oraz cechy niepodzielne – takie, które mogą być mierzone dopiero po wykonaniu wszystkich operacji. Dodatkowo, cechy podzielne mogą być wyrażane na dwa różne sposoby – liczbowo lub alternatywnie. Konieczność uwzględnienia rodzaju posiadanych danych przy wyborze odpowiedniego narzędzia do ich analizy podkreślają także Perry i Barker (2006), którzy wyróżniają narzędzia służące do analizy danych: ilościowych lub jakościowych, ciągłych lub dyskretnych, oraz „normalnych” (pochodzących z populacji, która może być modelowana za pomocą rozkładu normalnego) i „nie-normalnych” (pochodzących z populacji, która nie może być modelowana za pomocą rozkładu normalnego).

W inny sposób dzieli narzędzia stosowane w ramach zarządzania jakością Schneiderman (1998), który zaleca stosowanie innego podejścia i narzędzi dla procesów mniej skomplikowanych, a innego – w przypadku bardziej skomplikowanych procesów, w których występują z reguły bardziej skomplikowane problemy.

Odmienne podejście do klasyfikacji metod wspomagających zarządzanie jakością proponuje Hamrol (2007, s.363), który dzieli je na grupy, biorąc pod uwagę kryteria związane z korzyściami uzyskiwanymi dzięki ich zastosowaniu, a także z nakładami, jakich wymaga ich zastosowanie. Do kryteriów związanych z korzyściami Hamrol zalicza: trwałość i szybki wpływ na poprawę jakości, szybkie efekty jakościowe, oraz motywację do pracy zespołowej, natomiast do kryteriów związanych z nakładami: dodatkowe koszty, kwalifikacje, oraz czas potrzebny na zastosowanie tych metod.

Na inne kryterium podziału zwracają uwagę Breyfogle i Meadows (2001, s.103), wymieniając narzędzia stosowane w ramach algorytmu DMAIC. Rozróżniają oni dwie różne grupy metod analizy: metody pasywne – nie wymagające ingerencji w analizowany proces, oraz metody proaktywne, których zastosowanie wiąże się z taką ingerencją.

W Raporcie Technicznym PKN-ISO/TR 10017:2005, zawierającym wytyczne dotyczące wyboru właściwych technik statystycznych, jakie mogą być przydatne w odniesieniu do systemu zarządzania jakością zgodnego z wymaganiami ISO 9001:2000, przedstawiono między innymi techniki, jakie mają zastosowanie w procesie ciągłego doskonalenia (Polski Komitet Normalizacyjny, 2005, s.13-21). W ramach przedstawionych w raporcie zaleceń, nieco inne metody są wskazywane w zależności od tego, którego z wyróżnionych w raporcie czterech obszarów działalności organizacji (Projektowanie i rozwój, Zakupy, Produkcja i dostarczanie usługi, Nadzorowanie wyposażenia do monitorowania i pomiarów) ma dotyczyć doskonalenie. W szerokim ujęciu, obejmującym wiele różnych aspektów działania przedsiębiorstwa, podział taki może służyć za użyteczne kryterium doboru odpowiednich technik pomocnych w działaniach doskonalących.

3.4.4. Zestawienie i wspólna klasyfikacja najczęściej stosowanych metod, technik i narzędzi doskonalenia

W oparciu o zidentyfikowane kryteria (Tabela 3.5), dokonano wspólnego zestawienia szerokiej grupy najczęściej stosowanych metod, technik i narzędzi doskonalenia. Zebrano metody, techniki i narzędzia, które uznano za najczęściej zalecane i stosowane w działaniach związanych z doskonaleniem procesów. Zostały one wybrane na podstawie analizy zbiorów metod, technik i narzędzi doskonalenia podawanych w źródłach zawartych w Tabeli 3.5, a także wymienianych przez następujących autorów:

- Karaszewski (2005, s.211-276) – który przedstawia narzędzia stosowane w procesie doskonalenia jakości,
- Nonthaleerak i Hendry (2006, s.114-115) – którzy omawiają, na podstawie przeprowadzonego obszernego przeglądu literatury, najczęściej wymieniane w literaturze narzędzia doskonalenia stosowane w ramach strategii Six Sigma,
- Dolan (2003, s.25) – który wymienia, na podstawie przeprowadzonego badania ankietowego, najczęściej stosowane narzędzia doskonalenia procesów,
- Antony *et al.* (2004) – którzy wyszczególniają narzędzia wykorzystywane w ramach strategii Lean i Six Sigma, które były najczęściej stosowane w firmach objętych przez nich badaniem,
- Snee (2003) – który przedstawia osiem podstawowych narzędzi, jakie najczęściej znajdują zastosowanie w realizacji działań doskonalących prowadzonych w ramach strategii Six Sigma.

Sformułowany na tej podstawie zbiór najczęściej zalecanych i stosowanych metod, technik i narzędzi doskonalenia poddano klasyfikacjom, ze względu na wybrane kryteria. W pierwszej kolejności scharakteryzowano każde z nich poprzez zaliczenie do jednej

z czterech wyróżnionych kategorii, związanych z ogólnie rozumianym rodzajem i złożonością, to jest:

- metody, techniki i narzędzia opisowe,
- metody, techniki i narzędzia graficzne,
- metody, techniki i narzędzia obliczeniowe/statystyczne,
- metody i techniki złożone (z kilku metod lub narzędzi).

Klasyfikację metod, technik i narzędzi doskonalenia procesów, ze względu na ich tak określony rodzaj i złożoność, dokonaną w oparciu o opisany powyżej przegląd literatury, przedstawiono w Tabeli 3.6.

Tabela 3.6. Klasyfikacja metod, technik i narzędzi doskonalenia procesów ze względu na rodzaj i złożoność

Metody, techniki i narzędzia	Opisowe	Graficzne	Obliczeniowe /Statystyczne	Złożone (z kilku metod/ narzędzi)
Opis problemu				
Określenie celu				
Definiowanie i ustalanie zakresu projektu				
Analiza głosu klienta (ang. <i>Voice of the Customer</i> , VOC)				
Analiza charakterystyk krytycznych dla jakości (ang. <i>Critical To Quality</i> , CTQ)				
Burza mózgów				
FMEA – analiza rodzajów i skutków wad (ang. <i>Failure Mode and Effects Analysis</i>)				
5 x "Dlaczego?" (ang. <i>5 Why's</i>)				
Benchmarking				
Metody generowania pomysłów / Narzędzia pobudzania kreatywności				
Standaryzacja procesu				
<i>Poka Yoke</i> – zabezpieczanie przed błędami (ang. <i>Error Proofing / Mistake Proofing</i>)				
Plan kontroli procesu (ang. <i>Control Plan</i>)				
Karta projektu (ang. <i>Project Charter</i>)				
Wykres Ishikawy / Wykres przyczynowo-skutkowy (ang. <i>Cause and Effect Diagram</i>)				
Arkusz kontrolny (ang. <i>Check Sheet</i>)				
Stratyfikacja / rozwarstwienie danych (ang. <i>Stratification</i>)				
Wykres pokrewieństwa (ang. <i>Affinity Diagram</i>)				
Wykres zależności (ang. <i>Relations Diagram</i>)				
Wykres drzewa (ang. <i>Tree Diagram</i>)				

Wykres matrycowy (ang. <i>Matrix Diagram</i>)				
Macierzowa analiza danych (ang. <i>Matrix Data Analysis</i>)				
Wykres strzałkowy (ang. <i>Arrow Diagram</i>)				
Wykres planowania procesu decyzji (ang. <i>Process Decision Program Chart, PDPC</i>)				
PERT (ang. <i>Program Evaluation and Review Technique</i>)				
Wykres Gantta				
Analiza uczestników projektu (ang. <i>Stakeholder Analysis</i>)				
Analiza pola sił (ang. <i>Force Field Analysis</i>)				
Analiza SWOT				
Mapowanie procesu (Flowchart, SIPOC)				
QFD – rozwinięcie funkcji jakości (ang. <i>Quality Function Deployment</i>)				
Macierz Pugh'a (ang. <i>Pugh Matrix</i>)				
Zbieranie danych (planowanie, próbkowanie)				
Wskaźniki KPI (ang. <i>Key Performance Indicators</i>)				
Karta kontrolna (ang. <i>Control Chart</i>)				
Karta przebiegu procesu (ang. <i>Run Chart</i>)				
Histogram				
Analiza Pareto				
Wykres rozproszenia (ang. <i>Scatter Plot</i>)				
Wykres pudełkowy (ang. <i>Box Plot</i>)				
Wykres punktowy (ang. <i>Dot Plot</i>)				
Wykres pojedynczych wartości (ang. <i>Individual Value Plot</i>)				
Analiza drzewa błędów (ang. <i>Fault Tree Analysis, FTA</i>)				
Wykres <i>Multi-vari</i> (wieloczynnikowy)				
Badanie normalności rozkładu				
Analiza zdolności procesu				
Obliczanie poziomu sigma procesu				
Statystyczne sterowanie procesem (ang. <i>Statistical Process Control, SPC</i>)				
Analiza systemu pomiarowego (ang. <i>Measurement System Analysis</i>)				
Analiza korelacji				
Analiza regresji				
Planowanie eksperymentów (ang. <i>Design of Experiments, DOE</i>)				
ANOVA – analiza wariancji (ang. <i>Analysis of Variance</i>)				

ANOM – analiza wartości średnich (ang. <i>Analysis of Means</i>)				
Analiza Kosztów Jakości				
Eksploracja danych (ang. <i>Data Mining</i>)				
Statystyki opisowe				
Statystyki nieparametryczne				
Wnioskowanie statystyczne / Testowanie hipotez				
Badania pilotażowe (ang. <i>Pilot Studies</i>)				
Badania prototypu (ang. <i>Prototype Studies</i>)				

Źródło: opracowanie własne

Następnie, w ten sposób scharakteryzowane metody, techniki i narzędzia doskonalenia sklasyfikowano biorąc pod uwagę dwa kryteria, które uznano za posiadające największe znaczenie w odniesieniu do wyboru odpowiedniej metody czy narzędzia, jaki jest dokonywany podczas prowadzenia działań doskonalących. Za takie kryteria uznano:

- kryterium związane z chronologią – uwzględniające kolejność zastosowania poszczególnych metod, technik i narzędzi w ramach obranego sposobu doskonalenia,
- kryterium określające cel zastosowania – związane z zadaniem, jakie ma zostać wykonane przy użyciu danej metody, techniki czy narzędzia.

Obydwa wybrane kryteria uwzględniono poprzez przypisanie poszczególnych metod, technik i narzędzi do głównych zadań realizowanych w ramach kolejnych etapów uniwersalnego cyklu doskonalenia PDSA. Tak zdefiniowaną klasyfikację metod, technik i narzędzi doskonalenia procesów zamieszczono w Tabeli 3.7.

Tabela 3.7. Klasyfikacja metod, technik i narzędzi doskonalenia procesów ze względu na chronologię w cyklu PDSA i cel zastosowania

Metody, techniki i narzędzia	PLAN		DO		STUDY	ACT
	Identyfikacja problemu	Analiza problemu	Utworzenie rozwiązania	Wdrożenie rozwiązania	Ewaluacja i analiza wyników	Standaryzacja rozwiązania
Opis problemu						
Określenie celu						
Definiowanie i ustalanie zakresu projektu						
Analiza głosu klienta (ang. <i>Voice of the Customer</i> , VOC)						
Analiza charakterystyk krytycznych dla jakości (ang. <i>Critical To Quality</i> , CTQ)						
Analiza uczestników projektu (ang. <i>Stakeholder Analysis</i>)						
Analiza pola sił (ang. <i>Force Field Analysis</i>)						
Analiza SWOT						

QFD – rozwinięcie funkcji jakości (ang. <i>Quality Function Deployment</i>)						
Mapowanie procesu (Flowchart, SIPOC)						
Analiza drzewa błędów (ang. <i>Fault Tree Analysis, FTA</i>)						
Analiza Pareto						
5 x "Dlaczego?" (ang. <i>5 Why's</i>)						
Wykres Ishikawy / Wykres przyczynowo-skutkowy (ang. <i>Cause and Effect Diagram</i>)						
Wykres pokrewieństwa (ang. <i>Affinity Diagram</i>)						
Wykres zależności (ang. <i>Relations Diagram</i>)						
Wykres matrycowy (ang. <i>Matrix Diagram</i>)						
Macierzowa analiza danych (ang. <i>Matrix Data Analysis</i>)						
Wykres rozproszenia (ang. <i>Scatter Plot</i>)						
Wykres <i>Multi-vari</i> (wieloczynnikowy)						
Analiza korelacji						
Analiza regresji						
Planowanie eksperymentów (ang. <i>Design of Experiments, DOE</i>)						
Analiza systemu pomiarowego (ang. <i>Measurement System Analysis</i>)						
Zbieranie danych (planowanie, próbkowanie)						
Stratyfikacja / rozwarstwienie danych (ang. <i>Stratification</i>)						
Statystyki opisowe						
Histogram						
Wykres pudełkowy (ang. <i>Box Plot</i>)						
Wykres punktowy (ang. <i>Dot Plot</i>)						
Wykres pojedynczych wartości (ang. <i>Individual Value Plot</i>)						
Badanie normalności rozkładu						
Wnioskowanie statystyczne / Testowanie hipotez						
Statystyki nieparametryczne						
ANOVA – analiza wariancji (ang. <i>Analysis of Variance</i>)						
ANOM – analiza wartości średnich (ang. <i>Analysis of Means</i>)						
Eksploracja danych (ang. <i>Data Mining</i>)						
Analiza zdolności procesu						
Obliczanie poziomu sigma procesu						
Wskaźniki KPI (ang. <i>Key Performance Indicators</i>)						
Karta kontrolna (ang. <i>Control Chart</i>)						

Karta przebiegu procesu (ang. <i>Run Chart</i>)						
Statystyczne sterowanie procesem (ang. <i>Statistical Process Control, SPC</i>)						
Benchmarking						
Metody generowania pomysłów / Narzędzia pobudzania kreatywności						
Macierz Pugh'a (ang. <i>Pugh Matrix</i>)						
<i>Poka Yoke</i> – zabezpieczenie przed błędami (ang. <i>Error Proofing</i> / <i>Mistake Proofing</i>)						
Badania pilotażowe (ang. <i>Pilot Studies</i>)						
Badania prototypu (ang. <i>Prototype Studies</i>)						
Standaryzacja procesu						
Plan kontroli procesu (ang. <i>Control Plan</i>)						
FMEA – analiza rodzajów i skutków wad (ang. <i>Failure Mode and Effects</i> <i>Analysis</i>)						
Burza mózgów						
Karta projektu (ang. <i>Project Charter</i>)						
Arkusz kontrolny (ang. <i>Check Sheet</i>)						
Wykres drzewa (ang. <i>Tree Diagram</i>)						
Wykres strzałkowy (ang. <i>Arrow Diagram</i>)						
PERT (ang. <i>Program Evaluation and</i> <i>Review Technique</i>)						
Wykres Gantta						
Wykres planowania procesu decyzji (ang. <i>Process Decision Program</i> <i>Chart, PDPC</i>)						
Analiza Kosztów Jakości						

Źródło: opracowanie własne

Przedstawione powyżej zestawienia (Tab. 3.6 i Tab. 3.7) ukazują różnorodność metod, technik i narzędzi stosowanych podczas działań związanych z doskonaleniem jakości. Wśród najczęściej zalecanych i stosowanych znajdują się zarówno ogólne narzędzia o charakterze opisowym (np. burza mózgów, 5x „Dlaczego?”), jak i – mniej lub bardziej skomplikowane – techniki statystyczne (np. histogram, czy Planowanie eksperymentów), a także metody wywodzące się z obszaru zarządzania (np. Analiza pola sił, Analiza SWOT).

3.4.5. Metody, techniki i narzędzia wykorzystywane do redukcji zmienności procesów – podsumowanie

Podsumowując, należy podkreślić, że:

- Istnieje duży zbiór metod, technik i narzędzi, których zastosowanie może skutecznie wspomagać działania podejmowane w celu doskonalenia procesów poprzez redukcję ich naturalnej zmienności.
- Wielość i różnorodność metod, technik i narzędzi doskonalenia procesów utrudnia dokonanie wyboru odpowiedniego z nich na potrzeby określonego, rozwiązywanego problemu.
- W literaturze podkreślana jest istotność doboru odpowiedniej metody czy narzędzia do rozwiązywanego określonego problemu, jednak nie znaleziono spójnych wskazówek dotyczących takiego wyboru w odniesieniu do całego przebiegu działań doskonalących.
- Jako wytyczne odnośnie wyboru odpowiednich metod, technik i narzędzi doskonalenia procesów podawane są ich klasyfikacje ze względu na cel zastosowania, a także wskazuje się na którym etapie postępowania dana metoda czy narzędzie mogą zostać zastosowane.
- Chronologia oraz cel zastosowania wydają się być najbardziej użytecznymi wskazówkami dla dokonania wyboru odpowiedniej metody czy narzędzia. Ponadto, w odniesieniu do metod i narzędzi statystycznych ważną rolę odgrywa także rodzaj danych, jakie mogą zostać poddane analizie przy ich wykorzystaniu.
- Wiele z metod i narzędzi może znaleźć zastosowanie podczas więcej niż jednego etapu cyklu PDSA. Istnieje pewna grupa wszechstronnych narzędzi (np. narzędzia związane z zarządzaniem projektami), które mogą być stosowane na każdym z etapów działania.
- Spośród grupy najczęściej zalecanych i stosowanych metod i narzędzi wspomagających redukcję zmienności naturalnej procesów, najwięcej przeznaczonych jest do analizy problemu – przeprowadzanej na etapie Planuj (*Plan*) cyklu PDSA, a także podczas testowania wytypowanego rozwiązania na etapie Studiuj (*Study*). Są to przede wszystkim narzędzia graficzne – zarówno o charakterze opisowym, jak i obliczeniowym, przy czym część z nich składa się z kilku metod i/lub narzędzi.
- Metody i narzędzia stosowane na etapie identyfikacji problemu należą w przeważającej części do grupy metod i narzędzi opisowych i opisowo-graficznych.
- Najmniej liczna grupa metod, technik i narzędzi przeznaczona jest do wspomaganie działań prowadzonych na etapie Wykonaj (*Do*) cyklu PDSA. Może to wynikać z faktu, że dokonywane na tym etapie tworzenie rozwiązania opiera się przede wszystkim na wykorzystaniu odpowiedniej wiedzy przedmiotowej oraz procesowej, która jedynie w niewielkim stopniu może być wspomaganą zastosowaniem odpowiednich metod czy narzędzi doskonalenia.

4. OPRACOWANA METODYKA REDUKCJI ZMIENNOŚCI PROCESÓW OBRÓBKI SKRAWANIEM

4.1. Wytyczne do opracowania metodyki

Na podstawie przeprowadzonej analizy dwóch podejść do redukcji zmienności w procesach produkcyjnych: podejścia związanego z obszarem technologii obróbki skrawaniem, jak i podejścia wywodzącego się z Zarządzania Jakością, oraz stosowanych sposobów redukcji zmienności naturalnej procesów, a także przeglądu wchodzących w ich skład metod, technik i narzędzi, opracowano zbiór wytycznych, które stały się podstawą do opracowania *Metodyki redukcji zmienności procesów obróbki skrawaniem*.

Głównym zadaniem stawianym przed opracowaną metodyką jest skuteczne wspomaganie doskonalenia procesów produkcyjnych, rozumianego jako redukcja ich zmienności naturalnej, wynikającej z tzw. przyczyn losowych. Ponadto, zgodnie z przyjętym na wstępie założeniem, metodyka ma mieć zastosowanie w procesach obróbki skrawaniem. Biorąc pod uwagę tak określone cele i założenia, na podstawie przeprowadzonej analizy odpowiednich zagadnień związanych z redukcją zmienności procesów produkcyjnych (opisanej w Rozdziałach 2. i 3. niniejszej pracy), ustalono, że w celu jak najskuteczniejszego działania, opracowywana metodyka powinna:

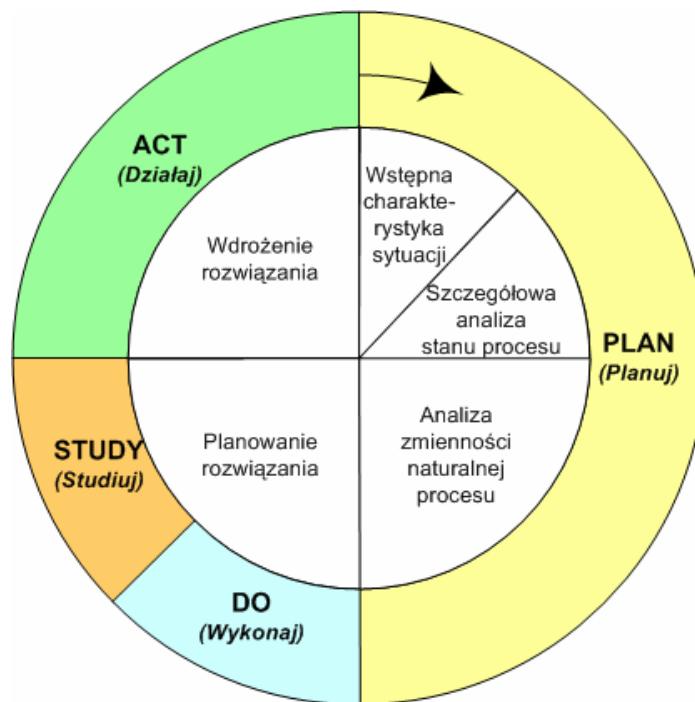
- Opierać się na uniwersalnym cyklu doskonalenia PDSA, skupiając się szczególnie na analizie problemu prowadzonej na etapie Planowania;
- Mieć formę uporządkowanego algorytmu;
- Obejmować ograniczoną liczbę metod i narzędzi, których zastosowanie powinno opierać się na jasno określonych kryteriach;
- Wymuszać rozróżnienie zmienności z przyczyn specjalnych od zmienności naturalnej procesu, wynikającej z przyczyn losowych (do redukcji której ma być przeznaczona);
- Uwzględniać zastosowanie metod i narzędzi statystycznych, jako najbardziej odpowiednich do celów opisu i analizy zmienności naturalnej procesu;
- Kłaść nacisk na odpowiednie zastosowanie metod i narzędzi oraz interpretację ich wyników;
- Opierać się na analizie danych, których odpowiednia jakość powinna być zapewniona m.in. dzięki sprawdzeniu zdolności pomiarowej stosowanego systemu pomiarowego;
- Uwzględniać ewentualne składowe strumienie produkcji, składające się na obserwowaną charakterystykę wyjściową badanego procesu;

a przede wszystkim:

- Przyczyniać się do sekwencyjnego budowania wiedzy procesowej w przedsiębiorstwie, dzięki połączeniu metod i narzędzi doskonalenia pochodzących z obszaru Zarządzania Jakością z odpowiednią wiedzą technologiczną.

4.2. Podstawowe założenia opracowanej metodyki

Strukturę opracowanej *Metodyki redukcji zmienności procesów obróbki skrawaniem* zaprojektowano zgodnie z przebiegiem cyklu doskonalenia PDSA. Główne etapy metodyki, wpisane w cykl PDSA, przedstawiono na Rysunku 4.1.



Rys.4.1. *Metodyka redukcji zmienności procesów obróbki skrawaniem* – główne etapy działania odpowiadające etapom cyklu PDSA

Źródło: opracowanie własne

Zgodnie z założeniami przedstawionymi w Rozdziale 1. niniejszej pracy, których podłoże szczegółowo przeanalizowano w Rozdziale 3., celem zastosowania opracowanej *Metodyki redukcji zmienności procesów obróbki skrawaniem* jest doskonalenie procesów produkcyjnych obróbki skrawaniem, rozumiane jako redukcja zmienności naturalnej tych procesów, wynikającej z oddziaływania tzw. losowych przyczyn zmienności. Przy opracowywaniu metodyki przyjęto podejście, przedstawione w Rozdziale 3.1.3 niniejszej pracy, zgodnie z którym redukcja zmienności naturalnej procesów możliwa jest dzięki identyfikacji jej głównych przyczyn, nazywanych także przyczynami dominującymi (np. Steiner i MacKay, 2005, s.15-18).

Osiągnięcie celu zastosowania opracowanej metodyki, jakim jest redukcja zmienności naturalnej procesów, wymaga głębokiego zrozumienia badanego procesu i natury jego zmienności. Aby umożliwić pozyskanie odpowiedniej wiedzy dotyczącej badanego procesu, a tym samym zapewnić jak największą skuteczność metodyki, w opracowanej metodyce szczególną uwagę poświęcono poszczególnym etapom analizy procesu i problemu, kładąc tym samym zdecydowany nacisk na etap planowania. W opracowanej metodyce etap Planuj (*Plan*) cyklu PDSA odbywa się poprzez realizację trzech etapów: *Wstępną charakterystykę sytuacji*, *Szczegółową analizę stanu procesu*, oraz *Analizę zmienności naturalnej procesu*. Etapy Wykonaj (*Do*) i Studiuj (*Study*) realizowane są w ramach etapu *Planowanie rozwiązania*, natomiast etap *Wdrożenie rozwiązania* jest odpowiednikiem etapu Działaj (*Act*) cyklu PDSA.

W ramach każdego z tak zaproponowanych etapów metodyki zdefiniowano określone zadania, które powinny zostać wykonane, aby możliwe było osiągnięcie celu, jaki postawiony został przed każdym z etapów. Następnie, do realizacji zadań, wybrano grupę metod, technik i narzędzi doskonalenia, które przypisano do kolejnych etapów działania, nadając im odpowiednią, jednoznaczną strukturę, zgodnie z zadaniami, jakie mają być wykonane w kolejnych etapach.

Przy doborze metod, technik i narzędzi doskonalenia kierowano się analizą wielu rzeczywistych projektów doskonalących, realizowanych w przedsiębiorstwach. Oparto się także na opisanej w Rozdziałach 3.4.3 i 3.4.4 analizie literatury, która pozwoliła zidentyfikować grupę najczęściej przytaczanych i uważanych za najskuteczniejsze narzędzi doskonalenia procesów. W literaturze, na podstawie informacji pochodzących z danych ankietowych wskazywane są narzędzia doskonalenia stosowane najczęściej w praktyce (Dolan, 2003; Antony *et al.*, 2004; Jednoróg *et al.*, 2003) – co może świadczyć o ich skuteczności, a opinie wyrażane przez ekspertów pozwalają zidentyfikować te najczęściej zalecane i uważane za najważniejsze (Bertels, 2003, s.210; Snee, 2003; Snee i Hoerl, 2003, s.193).

Wybierając odpowiednie do zastosowania w ramach opracowywanej metodyki metody i narzędzia, kierowano się założeniem, że zrozumienie zmienności, dzięki jej odpowiedniemu zmierzaniu i opisaniu w oparciu o dane pobrane z procesu – jako element niezbędny w dążeniu do redukcji zmienności naturalnej procesów – możliwe jest dzięki zastosowaniu statystyki (np. Snee i Hoerl, 2003, s.10). Dlatego, metody statystyczne są zalecane jako odpowiednie do postępowania z tzw. problemami chronicznymi (Juran i Gryna, 1974, s.30), ponieważ wspomagają one poprawianie skuteczności i efektywności organizacji, dzięki umożliwieniu przeprowadzenia analiz, pozwalających lepiej zrozumieć charakter, zakres, a także przyczyny zmienności procesów (Polski Komitet Normalizacyjny, 2006, s.21-23). Założenie takie jest zgodne z opisaną w Rozdziale 3.1.2 koncepcją Myślenia Statystycznego, którą zastosowano w opracowanej metodyce. Z tych powodów, w metodyce zawarto przede wszystkim metody i narzędzia statystyczne, których celem zastosowania jest przeprowadzenie analiz, pozwalających scharakteryzować i opisać zmienność naturalną analizowanego procesu, a także zidentyfikować główne źródła tej zmienności.

Analizując metody i narzędzia statystyczne stosowane do doskonalenia procesów produkcyjnych, a w szczególności sposób ich opisu w literaturze, zauważono dwa różne podejścia. W jednym z nich kładzie się bardzo duży nacisk na same metody i narzędzia, a stojące za nimi mechanizmy i założenia statystyczne są przedmiotem dyskusji, a nawet sporów (Woodall i Montgomery, 1999; Neave, 1997). Z drugiej strony, podkreślana jest przez niektórych specjalistów przede wszystkim istotność umiejętności praktycznego zastosowania tych metod i narzędzi (Parsons, 1992, s.29-30). W takim ujęciu wiele z dyskutowanych przez teoretyków niuansów często nie ma znaczenia. Podkreśla się zatem nie sam mechanizm statystyczny, ale konieczność jego umiejętnego doboru, zastosowania i odpowiedniej interpretacji otrzymanych wyników, tak aby na podstawie zebranych danych i przeprowadzonych analiz uzyskać potrzebne informacje i wyciągnąć wnioski w odniesieniu do badanego procesu. Takie podejście do zastosowania statystyki w analizie procesu jest zgodne z koncepcją prezentowaną przez Deminga (1994, s.131-133; Neave, 1997, s.107), który rozróżnił dwa rodzaje badań prowadzonych przy wykorzystaniu statystyki:

- tzw. *Enumerative Studies* (ang.) – badania czysto opisowe, polegające na zastosowaniu teorii i modeli statystycznych do opisu stanu obecnego lub przeszłego badanego procesu;

a także

- tzw. *Analytic Studies* (ang.) – badania analityczne, wykorzystujące statystykę do wykrycia przyczyn obecnego stanu badanego procesu i przewidzenia jego zachowania w przyszłości.

W myśl tej koncepcji, badania analityczne, skupiające się na wykorzystaniu statystyki do uzyskania potrzebnych informacji i odkrywania przyczyn analizowanych problemów, są odpowiednie dla celów analizy zmienności procesów. Takie podejście do wykorzystania

metod i narzędzi statystycznych zastosowano zatem w opracowanej metodyce, łącząc praktyczne zastosowanie odpowiednich metod analitycznych z odpowiednią wiedzą technologiczną i procesową, potrzebną do formułowania hipotez oraz odpowiedniej interpretacji uzyskanych wyników analiz.

Kierując się przedstawioną powyżej koncepcją, w opracowanej metodyce położono nacisk na praktyczne zastosowanie zaproponowanych w ramach kolejnych etapów metod i narzędzi statystycznych oraz odpowiednią interpretację uzyskanych wyników. Ponieważ jednym z głównych założeń metodyki jest możliwość jej praktycznego zastosowania, założono, że powinna ona skupiać się na aspekcie praktycznym stosowanych metod i narzędzi, jednocześnie w jak najmniejszym stopniu – na tyle, na ile jest to możliwe – obciążając użytkownika koniecznością poznania teoretycznych aspektów związanych z tymi narzędziami. Wzięto pod uwagę także opinie wyrażane przez specjalistów, którzy niejednokrotnie udowadniają, że wiele z metod i narzędzi statystycznych spełnia swoje zadanie i pozwala uzyskać dobre wyniki w wielu różnych sytuacjach, nawet gdy nie są spełnione teoretyczne założenia, których spełnienie przez wielu teoretyków może być uważane za warunek konieczny do ich zastosowania (np. Neave, 1997; Wheeler, 1998). Dlatego, w opracowanej metodyce, wyraźnie wskazano na potrzebę sprawdzenia odpowiednich założeń, jednak tylko tych, które uważane są za niezbędne minimum, w odniesieniu do stosowanych metod i narzędzi statystycznych. Ponadto, z uwagi na fakt, że same metody i narzędzia zastosowane w opracowanej metodyce są szeroko opisywane w literaturze, a także wiele z nich może być zastosowanych przy użyciu któregoś z wielu dostępnych obecnie programów komputerowych, opis mechanizmu, stojącego za każdą z metod i każdym z narzędzi, pozostawiono poza zakresem niniejszej metodyki. Jednocześnie wskazano w opisie metodyki przykładowe pozycje literaturowe, w których można znaleźć szczegółowe informacje potrzebne do zastosowania proponowanych metod i narzędzi.

Opierając się na opisanych założeniach, w ramach przedstawionych wcześniej etapów opracowanej *Metodyki redukcji zmienności procesów obróbki skrawaniem*, zaproponowano odpowiednie działania, metody i narzędzia. Mając na uwadze, podkreślaną w literaturze (np. McManus, 1999, s.35; Snee i Hoerl, 2003, s.207-208), istotność wyraźnego połączenia poszczególnych metod i narzędzi doskonalenia w ustalone sekwencje, wszystkim działaniom zawartym w opracowanej metodyce nadano odpowiednią kolejność. Poszczególne metody i narzędzia połączono w sekwencje, wykorzystując powiązania pomiędzy ich wyjściami i wejściami, a także zdefiniowano wszystkie niezbędne punkty decyzyjne i uwzględniono różne możliwe ścieżki postępowania. Tym samym, całej metodyce nadano formę jednoznacznego algorytmu. Zastosowanie tak sformułowanej metodyki polega zatem na podejmowaniu wskazywanych działań, wiodących przez kolejne etapy opisu i analizy problemu, prowadzących do identyfikacji i wyeliminowania lub zmniejszenia wpływu zidentyfikowanej przyczyny na zmienność odpowiedniej charakterystyki wyjściowej. Dzięki temu, opracowana *Metodyka redukcji zmienności procesów obróbki skrawaniem* pozwala na jednoznaczny wybór odpowiednich metod, technik i narzędzi doskonalenia w danej rozpatrywanej sytuacji.

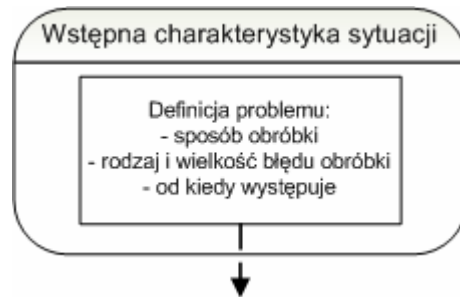
Działania zawarte w każdym z głównych etapów opracowanej metodyki szczegółowo omówiono w kolejnych podrozdziałach.

4.3. Etap I: Wstępna charakterystyka sytuacji

Tok metodyki uruchamiany jest w przypadku, gdy w procesie obróbki skrawaniem pojawia się problem zbyt dużej zmienności wartości błędu obróbki, powstającego w produkowanych wyrobach. W pierwszym etapie metodyki zbierane są wstępne informacje

dotyczące zastanej sytuacji (Rysunek 4.2). Podstawowe informacje, jakie powinny zostać określone na tym etapie, to:

- sposób obróbki, jakiego dotyczy badany problem,
- rodzaj i wielkość błędu obróbki,
- dostępne dane dotyczące okresu występowania danego błędu obróbki.



Rys.4.2. Pierwszy etap *Metodyki redukcji zmienności procesów obróbki skrawaniem* – Wstępna charakterystyka sytuacji

Źródło: opracowanie własne

4.4. Etap II: Szczegółowa analiza stanu procesu

Drugi etap opracowanej metodyki obejmuje przeprowadzenie szczegółowej analizy stanu procesu, której celem jest zebranie istotnych informacji dotyczących badanego procesu i powstającego błędu obróbki, a także ustalenie celu dalszych działań. Działania, jakie obejmuje ten etap metodyki, przedstawiono na Rysunku 4.3.

Pierwszym krokiem tego etapu jest sporządzenie mapy analizowanego procesu, w celu zlokalizowania miejsc (operacji) w badanym procesie, w których kształtowana jest cecha wyrobu, jakiej dotyczy problem. Mapa procesu może mieć np. formę schematu blokowego (ang. *Flowchart*) lub diagramu SIPOC (patrz np.: Pyzdek, 2001, s.272-273).

Kolejny krok to zebranie danych (ciągłych) dotyczących analizowanej charakterystyki wyjściowej procesu – *Y* – opisującej występującą niedokładność obróbki. Krok ten obejmuje następujące działania:

- Analizę danych historycznych – jeśli są dostępne;
- Sporządzenie planu zbierania aktualnych danych – z uwzględnieniem ewentualnych „strumieni produkcji” (zagadnienie planowania zbierania danych opisywane jest m.in. przez: Breyfogle’a, 2003, s.79-80);
- Wykonanie analizy systemu pomiarowego (ang. *Measurement System Analysis, MSA*), mającego posłużyć do zebrania danych;
- Zebranie aktualnych danych, dokonując – jeśli to możliwe – ich stratyfikacji z uwagi na potencjalnie istotne czynniki.



Rys.4.3. Drugi etap *Metodyki redukcji zmienności procesów obróbki skrawaniem* – Szczegółowa analiza stanu procesu

Źródło: opracowanie własne

Na etapie zbierania danych uwzględniono zjawisko tzw. strumieni produkcji (przytoczone w Rozdziale 3.1.3 niniejszej pracy), które opisane zostało m.in. przez Deminga (1994, s.354-356). Zauważył on, że wiele procesów składa się w rzeczywistości z kilku „strumieni” (np. kilka linii produkcyjnych, na których wytwarzany jest ten sam produkt), których wyniki działania traktowane są często jako jeden wspólny zbiór. W przypadku dążenia do poprawienia wyników działania takiego procesu, dopiero rozdzielenie go na poszczególne strumienie i analizowanie każdego z nich z osobna, może przynieść pożądane efekty. Często w takich przypadkach może się okazać, że aby zmniejszyć zmienność analizowanego procesu konieczne jest sprowadzenie składających się na niego strumieni do wspólnego poziomu lub/i zmniejszenie zmienności w ramach każdego z nich. Dodatkowo, możliwa jest sytuacja, w której takie strumienie, nazywane też „podprocesami”, składające się na proces będący w stanie statystycznie stabilnym, nie są pod kontrolą statystyczną (Rohleder i Silver, 1997). Dlatego do redukcji zmienności procesu może się również przyczynić ustabilizowanie jego „podprocesów”. Biorąc to pod uwagę, w opracowanej metodyce zalecono identyfikację „strumieni produkcji” i ich uwzględnienie przy zbieraniu danych dotyczących badanej charakterystyki wyjściowej procesu.

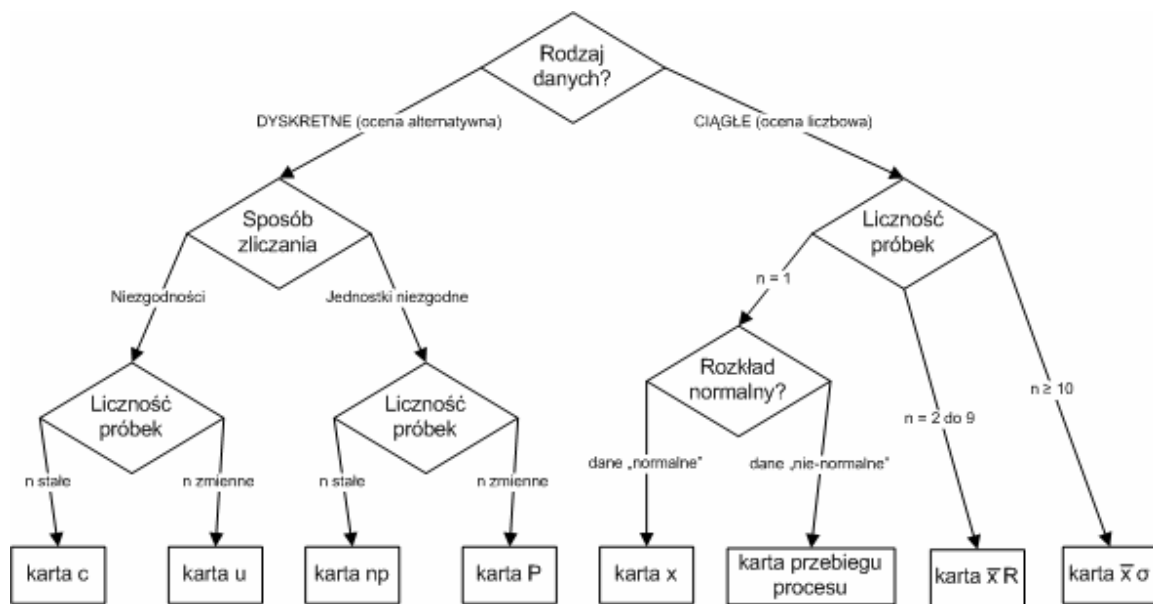
Z uwagi na fakt, że opracowana metodyka bazuje przede wszystkim na danych zebranych w analizowanym procesie, jednym z działań, jakie powinny zostać wykonane jest przeprowadzenie analizy systemu pomiarowego (ang. *Measurement System Analysis*, MSA), który ma służyć do ich zbierania. Analiza ta umożliwi jednocześnie uwzględnienie jednego z potencjalnie istotnych elementów składających się na obserwowaną zmienność procesu, jaką jest zmienność wnoszona przez stosowany system pomiarowy (tzw. błąd pomiaru). Szczegóły dotyczące analizy systemu pomiarowego przedstawiają m.in. Dietrich i Schulze (2000, s.309-340), Pyzdek (2001, s.246-268), Breyfogle (2003, s.306-346).

W następnym kroku zalecane jest sprawdzenie czy badana charakterystyka może być modelowana za pomocą rozkładu normalnego (Gaussa). Sprawdzenie to ma ułatwić dobór odpowiednich metod i narzędzi statystycznych, stosowanych w dalszym toku metodyki, bowiem niektóre z nich opierają się na założeniu, że populacja, z której pochodzą zebrane dane może być modelowana za pomocą rozkładu normalnego. Odpowiedniego sprawdzenia dokonać można przy użyciu siatki prawdopodobieństwa rozkładu normalnego (lub innych rozkładów prawdopodobieństwa), a także odpowiednich testów statystycznych - tzw. testów zgodności (patrz np.: Dietrich i Schulze, 2000, s.212-224). Jednak przede wszystkim należy tutaj kierować się wiedzą procesową, która powinna stanowić podstawę do ustalenia jakim teoretycznym rozkładem prawdopodobieństwa można opisać populację, z której pochodzą zbierane dane. Należy pamiętać o tym, że wiele charakterystyk z natury nie odpowiada rozkładowi normalnemu (np. cechy ograniczone naturalnie przez zero). Jeśli badana charakterystyka nie może być modelowana za pomocą rozkładu normalnego, na tym etapie przydatne jest sprawdzenie jakim innym teoretycznym rozkładem prawdopodobieństwa może być ona opisywana, co umożliwi dobór odpowiednich narzędzi do dalszych analiz.

Ponieważ opracowana metodyka jest przeznaczona do redukcji zmienności naturalnej procesów, konieczne jest ustalenie czy analizowany proces podlega wyłącznie przyczynom losowym zmienności, czy też oddziałują na niego także przyczyny specjalne. Służy temu kolejny krok, w ramach którego analizowany jest tzw. Głos Procesu (ang. *Voice of the Process*, VOP). Do tego celu stosuje się karty kontrolne, które pozwalają odróżnić zmienność naturalną procesu od zmienności wynikającej z przyczyn specjalnych. Sposób doboru i konstruowania kart kontrolnych jest szeroko opisany w literaturze (patrz np.: Thompson i Koronacki, 1994, s.49-172; Dietrich i Schulze, 2000, s.132-211; Pyzdek, 2001, s.377-434; Breyfogle, 2003, 204-253; Polski Komitet Normalizacyjny, 1996). Dobór odpowiedniej karty kontrolnej zależy od takich czynników jak rodzaj posiadanych danych, licznosc pobieranych próbek, a także teoretyczny rozkład prawdopodobieństwa, jakim modelowana może być badana charakterystyka. Przykładowy algorytm doboru karty kontrolnej przedstawiono na Rysunku 4.4.

Sprawdzenie stabilności, dokonywane w tym kroku, powinno dotyczyć zarówno całego badanego procesu, jak i ewentualnych, zidentyfikowanych wcześniej „strumieni produkcji”, wchodzących w jego skład.

Po sprawdzeniu stabilności procesu, w przypadku gdy analizowany proces lub któryś ze składających się na niego „strumieni produkcji” wykazuje brak stabilności, konieczne jest ich ustabilizowanie poprzez zidentyfikowanie i usunięcie przyczyny (przyczyn) specjalnych zmienności, zakłócającej (zakłócających) naturalny przebieg procesu lub jego „strumieni”. Działanie to znajduje się poza zakresem niniejszej metodyki. Po ustabilizowaniu, jeżeli problem zbyt dużej zmienności będzie nadal występował, proces może być ponownie poddany działaniu proponowanej metodyki. Jeżeli natomiast analizowany proces oraz poszczególne „strumienie” nie wykazują niestabilności, możliwe jest przejście do kolejnego kroku metodyki.



Rys.4.4. Przykładowy algorytm doboru odpowiedniej karty kontrolnej

Źródło: na podstawie Pyzdek, 2001, s.419

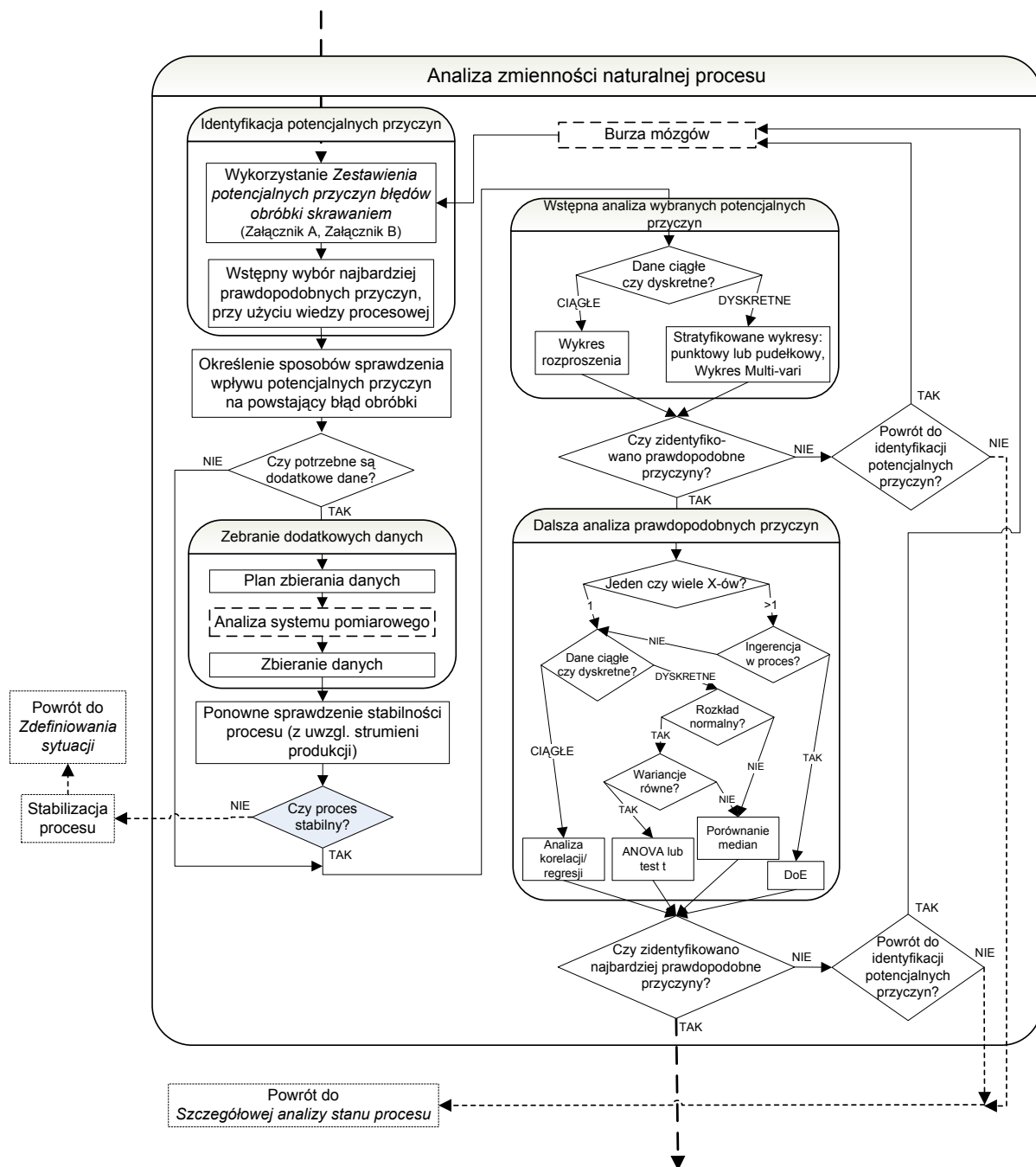
W następnym kroku przeprowadzana jest analiza zdolności badanego procesu, pozwalająca określić w jakim stopniu Głos Procesu odpowiada na Głos Klienta (stawiane wymagania). Porównanie zakresu zmienności procesu z określonym dla badanej cechy polem tolerancji, oraz obliczone wskaźniki zdolności procesu pozwalają ocenić czy proces w swoim aktualnym stanie jest zdolny do spełniania stawianych przed nim wymagań. Jeżeli zidentyfikowano w procesie „strumienie produkcji”, przeprowadzenie analizy zdolności dla każdego z nich może pomóc w określeniu czy dalsze działania powinny obejmować cały dotychczas analizowany proces, czy też powinny skupić się na którymś z wyróżnionych strumieni. Szczegóły analizy zdolności procesu zostały opisane m.in. przez Dietricha i Schulze (2000, s.239-266), Pyzdka (2001, s.452-464), Breyfogle’a (2003, s.254-305).

W wyniku badań i analiz przeprowadzonych w etapie *Szczegółowej analizy stanu procesu*, precyzowany jest cel doskonalenia, do którego prowadzić mają kolejne etapy metodyki.

Przy ustalaniu celu doskonalenia należy wziąć pod uwagę także różnego rodzaju ograniczenia, przede wszystkim technologiczne i ekonomiczne, wyznaczające pewne możliwe do osiągnięcia granice dokładności obróbki (patrz np. Kacalak, 2005). Ważną rolę odgrywają tu ograniczenia związane z ekonomicznym poziomem dokładności, możliwym do osiągnięcia w danym procesie. Należy pamiętać, że wraz ze wzrostem dokładności obróbki rosną koszty wykonania (patrz np. Choroszy, 2000, s.48).

4.5. Etap III: Analiza zmienności naturalnej procesu

Trzecim etapem opracowanej metodyki jest *Analiza zmienności naturalnej procesu*. W zakres tego etapu wchodzi takie główne działania, jak: identyfikacja potencjalnych przyczyn powstawania analizowanego błędu obróbki oraz ich analiza, prowadzona w oparciu o zebrane dane. Szczegółowe kroki działań zawartych w tym etapie metodyki przedstawiono na Rysunku 4.5.



Rys.4.5. Trzeci etap *Metodyki redukcji zmienności procesów obróbki skrawaniem* – Analiza zmienności naturalnej procesu

Źródło: opracowanie własne

Pierwszym działaniem tego etapu opracowanej metodyki jest *Identyfikacja potencjalnych przyczyn*. W tym miejscu metodyki zaproponowano włączenie odpowiedniego zasobu wiedzy technologicznej, której zadaniem jest znaczne usprawnienie procesu poszukiwania potencjalnych przyczyn powstawania analizowanego błędu obróbki w badanym procesie. W tym celu zaprojektowano i opracowano narzędzie wspomagające, w postaci *Zestawienia potencjalnych przyczyn błędów obróbki skrawaniem*. Omówienie tego narzędzia przedstawiono w kolejnym podrozdziale.

4.5.1. Zestawienie potencjalnych przyczyn błędów obróbki skrawaniem

Przedstawiona w Rozdziale 2. niniejszej pracy analiza podejść do redukcji zmienności w procesach obróbki skrawaniem, a w szczególności analiza źródeł literaturowych z zakresu obróbki skrawaniem, zawierających informacje dotyczące potencjalnych przyczyn powstających błędów obróbki, pozwoliła na zidentyfikowanie odpowiedniej wiedzy technologicznej, potrzebnej do wspomagania działań doskonalących prowadzonych w procesach obróbki skrawaniem. Wiedzę tę zebrano w formie *Zestawienia potencjalnych przyczyn błędów obróbki skrawaniem*, które przedstawiono w Załączniku A do niniejszej pracy.

Opracowane *Zestawienia potencjalnych przyczyn błędów obróbki skrawaniem* (Załącznik A), powstało w oparciu o szczegółową analizę literatury z zakresu technologii obróbki skrawaniem (przede wszystkim: Kolman *et al.*, 1969; Kaczmarek, 1970; Andrzejewski *et al.*, 1993; Choroszy, 2000; Skoczyński, 2001).

Zestawienie ma formę tabeli, w której kolejnych kolumnach umieszczono:

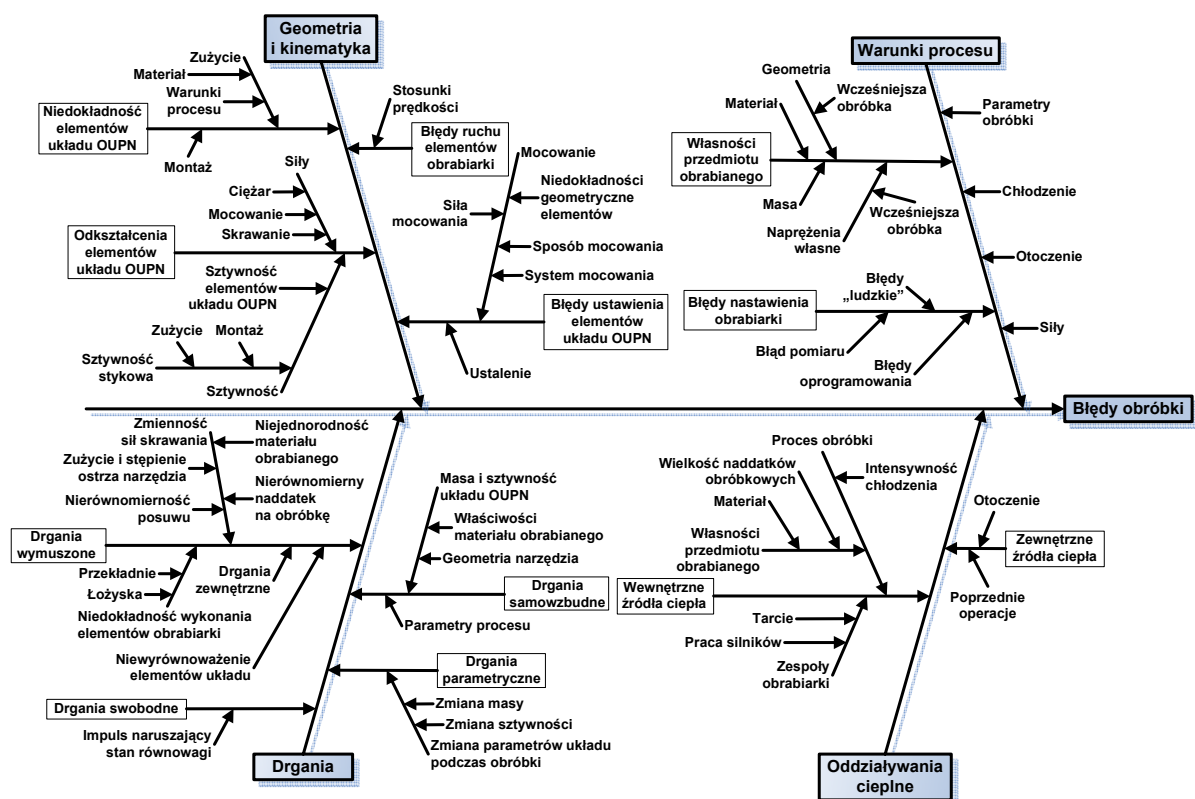
1. Nazwę sposobu obróbki, uwzględniając:
 - wskazówki uniwersalne, dotyczące każdego sposobu obróbki skrawaniem (kategoria: „wszystkie sposoby obróbki skrawaniem”),
 - toczenie,
 - frezowanie,
 - struganie,
 - wiercenie i rozwiercanie,
 - przeciąganie,
 - szlifowanie,
 - gładzenie (honowanie),
 - obróbkę powierzchni tworzonych kinematycznie, np. toczenie gwintów, czy obróbkę kół zębatach,a także wskazówki dotyczące szczególnych przypadków wyżej wymienionych sposobów obróbki skrawaniem.
2. Nazwę rodzaju błędu obróbki, przyjmując generalny podział na:
 - błędy wymiaru,
 - błędy kształtu,
 - błędy położenia,
 - błędy złożone położenia i kształtu,
 - błędy powierzchni.
3. Ewentualny szczegółowy opis błędu obróbki występującego w danym przypadku.
4. Opis potencjalnej przyczyny danego błędu obróbki.
5. Nazwę kategorii, do jakiej zaliczono daną przyczynę błędu obróbki, wykorzystując zaproponowaną ujednoliconą klasyfikację (patrz Rysunek 4.6) – aby zapewnić spójność zestawienia.
6. Jeśli były zidentyfikowane – dodatkowe podprzyczyny, mogące mieć wpływ na występowanie danej przyczyny błędu obróbki, lub inne istotne uwagi. Ich znajomość może mieć duże znaczenie zarówno na etapie identyfikacji przyczyn błędów jak i na etapie szukania rozwiązania.

W opracowanym zestawieniu umieszczono wszystkie zebrane informacje. Puste komórki w tabeli oznaczają brak danych. Tabelę uporządkowano kolejno według kolumny 1., 2., 3. i 5., umożliwiając szybkie odszukanie nazwy sposobu obróbki i błędu występującego w dowolnym analizowanym przypadku. Zestawienie zawiera 366 zidentyfikowanych potencjalnych przypadków.

Z uwagi na fakt, że zebrane w opracowanym zestawieniu potencjalne przyczyny błędów obróbki skrawaniem pochodzą w różnych źródłach literaturowych, w celu zapewnienia spójności zestawienia, zaproponowano jednolitą klasyfikację potencjalnych przyczyn błędów obróbki skrawaniem. Przy jej opracowywaniu odniesiono się do głównych występujących oddziaływań, takich jak:

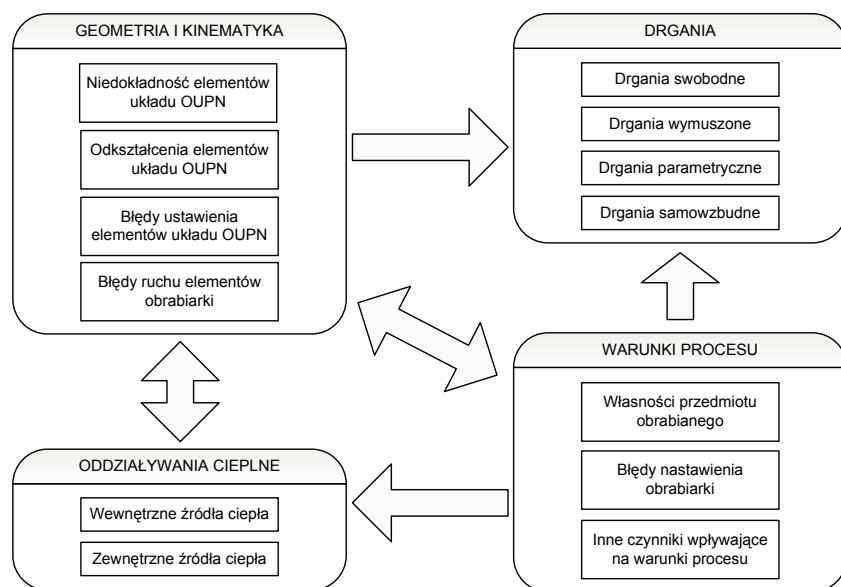
- oddziaływania geometryczne i kinematyczne,
- oddziaływania cieplne,
- szeroko rozumiane warunki procesu,
- drgania występujące w procesie.

Zaproponowaną klasyfikację potencjalnych błędów obróbki, którą zastosowano w opracowanym *Zestawieniu potencjalnych przyczyn błędów obróbki skrawaniem*, przedstawiono w formie diagramu przyczynowo-skutkowego na Rysunku 4.6.



Rys.4.6. Zaproponowana klasyfikacja głównych potencjalnych przyczyn błędów obróbki
Źródło: opracowanie własne

Wzajemne zależności istniejące pomiędzy poszczególnymi wyróżnionymi w zaproponowanej klasyfikacji kategoriami, przedstawiono w sposób schematyczny na Rysunku 4.7.



Rys.4.7. Zaproponowane podstawowe kategorie przyczyn błędów obróbki i zależności pomiędzy nimi.

Źródło: opracowanie własne

Opracowane *Zestawienie potencjalnych przyczyn błędów obróbki skrawaniem*, w formie tabeli (Załącznik A), może być skutecznie wykorzystane do realizacji postawionego przed nim celu, jakim jest znaczące ułatwienie identyfikacji potencjalnych przyczyn występującego błędu obróbki skrawaniem. Ponieważ jednak przeznaczeniem i jednym z głównych celów stawianych przed opracowaną *Metodyką redukcji zmienności procesów obróbki skrawaniem* jest możliwość jej zastosowania do doskonalenia rzeczywistych procesów w przedsiębiorstwach, w trosce o wygodę zastosowania, opracowanemu *Zestawieniu potencjalnych przyczyn błędów obróbki skrawaniem* nadano także formę systemu ekspertowego (Załącznik B do niniejszej pracy).

4.5.2. Wiedza ekspercka w opracowanej metodyce – system ekspertowy

Opracowana metodyka łączy sposób postępowania oraz metody, techniki i narzędzia pochodzące z obszaru Zarządzania Jakością z szerokim zakresem wiedzy z obszaru technologii obróbki skrawaniem. Wiedza ta została zgromadzona i przedstawiona jako *Zestawienie potencjalnych przyczyn błędów obróbki skrawaniem* w postaci liczącej 366 pozycje tabeli (Załącznik A) i jest ona jednym z głównych elementów etapu trzeciego opracowanej metodyki (*Analiza zmienności naturalnej procesu*), udostępniając zbiór potencjalnych przyczyn dla danego analizowanego problemu. Ponieważ przeznaczeniem opracowanej metodyki jest jej praktyczne zastosowanie w istniejących procesach produkcyjnych, aby ułatwić użytkownikowi korzystanie z zebranej wiedzy, zaproponowano jej prezentację w postaci systemu ekspertowego.

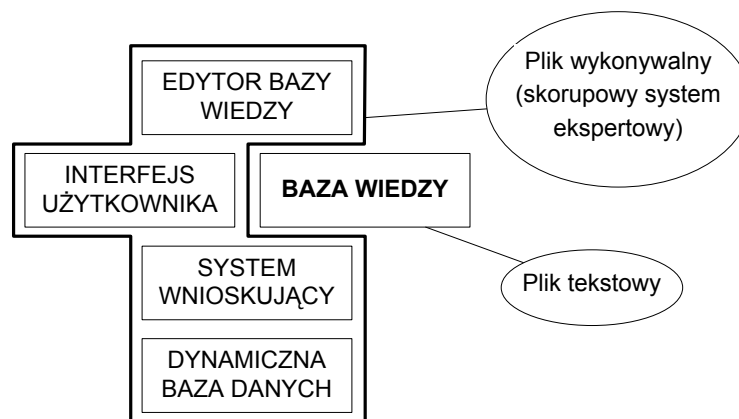
Zgodnie z definicją podaną przez Rutkowskiego (2005, s.7), system ekspertowy to: „»inteligentny« program komputerowy, stosujący wiedzę i procedury rozumowania (wnioskowania) w celu rozwiązywania problemów, które wymagają doświadczenia ludzkiego (eksperta), nabytego przez wieloletnią działalność w danej dziedzinie”. Uznano zatem, że system ekspertowy będzie odpowiednim narzędziem wspomagającym działania podejmowane w celu redukcji zmienności procesów produkcyjnych, dzięki jego własnościom

umożliwiający zgromadzenie i zapewnienie wygodnego dostępu do rozległej wiedzy technologicznej i wiedzy procesowej (opartej na bogatym doświadczeniu).

Ogólna struktura systemu ekspertowego składa się z trzech głównych elementów (Rutkowski, 2005, s.7): bazy wiedzy, zawierającej przedmiotową wiedzę ekspercką, tzw. maszyny wnioskującej, oraz interfejsu użytkownika, służącego do komunikacji. Nieco bardziej szczegółowo elementy wchodzące w skład systemu ekspertowego opisuje Niederliński (2000, s.17), wymieniając elementy podstawowe:

- Bazę wiedzy, zawierającą tzw. wiedzę dziedzinową, potrzebną do rozwiązywania problemów;
 - System wnioskujący, korzystający z bazy wiedzy do celów przeprowadzenia wnioskowania;
- oraz elementy pomocnicze:
- Dynamiczną bazę danych, w której przechowywane są odpowiedzi użytkownika i wyniki wnioskowania;
 - Edytor bazy wiedzy, służący do czytania, formułowania i modyfikowania bazy wiedzy;
 - Interfejs użytkownika, umożliwiający komunikowanie się z systemem wnioskującym oraz edytorem bazy wiedzy.

Do prezentacji zgromadzonej wiedzy z zakresu technologii obróbki skrawaniem, służącej do wykorzystania w ramach opracowanej metodyki, wykorzystano tzw. skorupowy system ekspertowy, który jest gotowym plikiem wykonywalnym. Utworzenie pełnego systemu ekspertowego wymaga więc w takim przypadku jedynie uzupełnienia Bazy wiedzy, która jest modyfikowalnym plikiem tekstowym. Schematyczną strukturę systemu ekspertowego przedstawia Rysunek 4.8.



Rys.4.8. Struktura informatyczna skorupowego systemu ekspertowego

Źródło: Niederliński, 2000, s.20

Systemy ekspertowe oferują wygodny dla użytkownika sposób reprezentacji wiedzy, dlatego znajdują wiele praktycznych zastosowań. Podczas studiów literaturowych zidentyfikowano kilka przykładów prezentujących możliwość zastosowania systemów ekspertowych do doskonalenia procesów produkcyjnych. W przykładach tych najczęściej wykorzystuje się metodę *Case-Based Reasoning* (CBR), która polega na składowaniu rozwiązań wcześniej rozwiązanych problemów i wykorzystywaniu ich przy rozwiązywaniu kolejnych (Pokojski, 2005, s.171).

Wśród znalezionych przykładów znajdują się zarówno opisy koncepcji, jak i prezentacje rzeczywistych zastosowań systemów bazujących na idei systemów ekspertowych i metody *Case-Based Reasoning*, pełniących funkcję wsparcia dla działań związanych z zarządzaniem procesami produkcyjnymi i ich doskonaleniem; np.:

- Liu i Ke (2007) przedstawiają w ogólny sposób koncepcję wykorzystania metody CBR do zaprojektowania struktury i sposobu działania systemu wspierania wiedzy w przedsiębiorstwie, do celów rozwiązywania problemów w procesach produkcyjnych.
- Dooley *et al.* (2000) prezentują ogólną propozycję połączenia systemu informatycznego z systemem jakości przedsiębiorstwa w jedną bazę wiedzy – tzw. *Process Quality Knowledge Base* – gromadzącą całą wiedzę dotyczącą funkcjonujących w przedsiębiorstwie procesów, na potrzeby planowania, sterowania i doskonalenia jakości.
- Pokojński (2004) przedstawia próbę zastosowania metody CBR w projektowaniu maszyn, na przykładzie procesu projektowego.
- Skołod *et al.* (2005) prezentują przykład zastosowania systemu ekspertowego wspomagającego podejmowanie decyzji w zakresie harmonogramowania produkcji.
- Garben *et al.* (1995) opisują strukturę i sposób działania opracowanego systemu ESPANDA – bazującego na koncepcji CBR systemu informatycznego, wspomagającego projektowanie technologii wytwarzania, poprzez ułatwienie doboru parametrów procesów obróbkowych.
- Santos i Barbosa (2006) przedstawiają budowę i zastosowanie opracowanego systemu ekspertowego Qualifound, przeznaczonego do doskonalenia jakości w odlewniach, którego podstawę stanowi baza danych dotyczących defektów powstających w procesie.

Przytoczone powyżej przykłady ukazują szeroki zakres możliwości i praktyczną użyteczność systemów ekspertowych oraz metody *Case-Based Reasoning*. Nie znaleziono jednak przykładu zastosowania systemu ekspertowego jako sposobu zgromadzenia wiedzy i wspomagania identyfikacji potencjalnych przyczyn błędów obróbki, będącego elementem całościowej metodyki doskonalenia procesów i mającego zastosowanie dla procesów obróbki skrawaniem. Dlatego za właściwe i potrzebne uznano opracowanie takiego systemu na potrzeby wykorzystania w ramach opracowanej *Metodyki redukcji zmienności procesów obróbki skrawaniem*.

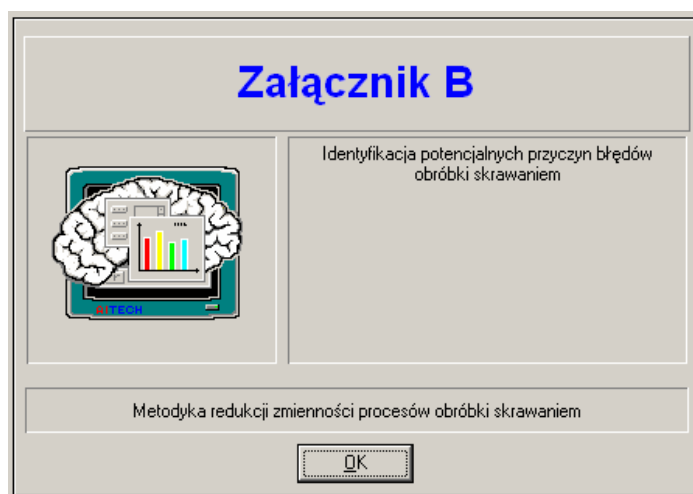
W przypadku opracowanej metodyki, proponowany system ekspertowy opierać ma się początkowo na bazie wiedzy wypełnionej potencjalnymi przyczynami problemu pochodzącymi z zasobów wiedzy pozyskanej z podręczników i źródeł naukowo-badawczych na temat technologii obróbki skrawaniem. Jednak w miarę wykorzystywania metodyki do doskonalenia procesów w przedsiębiorstwie, dzięki zastosowaniu ostatniego kroku metodyki, w którym zalecane jest tworzenie tzw. *Biblioteki przypadków*, baza wiedzy może być rozszerzana o kolejne informacje dotyczące rozwiązanych problemów. Tym samym rosnąć będzie zarówno wiedza przedsiębiorstwa o działających w nim procesach (wiedza procesowa), jak i wartość samej metodyki, jako „skrojonego na miarę” narzędzia wspomagającego zarządzanie wiedzą w przedsiębiorstwie.

Do celu reprezentacji *Zestawienia potencjalnych przyczyn błędów obróbki skrawaniem* (Załącznik A) w postaci systemu ekspertowego, wykorzystano szkieletowy system ekspertowy PC-Shell 4.0, będący częścią pakietu sztucznej inteligencji Sphinx 4.0 firmy AITECH. Dla zobrazowania sposobu działania proponowanego rozwiązania, szkieletowy

system ekspertowy wypełniono jedynie częścią informacji zawartych w obszernym *Zestawieniu potencjalnych przyczyn błędów obróbki skrawaniem* (Załącznik A). Przykładowy system ekspertowy, zawarty w Załączniku B, zawiera ogólne informacje dotyczące wszystkich sposobów obróbki skrawaniem (znajdujące się w pierwszej części tabeli w Załączniku A – wiersze od 1 do 94), a także informacje odnoszące się do jednego ze sposobów obróbki – wiercenia (wiersze od 247 do 306 w Załączniku A), pozwalające zidentyfikować potencjalne przyczyny powstających błędów obróbki.

Korzystanie z zaproponowanego systemu ekspertowego przebiega następująco:

1. Otwarcie programu PC-Shell, z pakietu Sphinx.
2. Otwarcie pliku Załącznik_B.BBW, znajdującego się w folderze „Załącznik B” – pojawi się okno informacyjne programu (Rysunek 4.9).



Rys.4.9. Okno informacyjne opracowanego systemu ekspertowego *Identyfikacja potencjalnych przyczyn błędów obróbki skrawaniem* w programie PC-Shell

Źródło:

opracowany system ekspertowy *Identyfikacja potencjalnych przyczyn błędów obróbki skrawaniem* (PC-Shell)

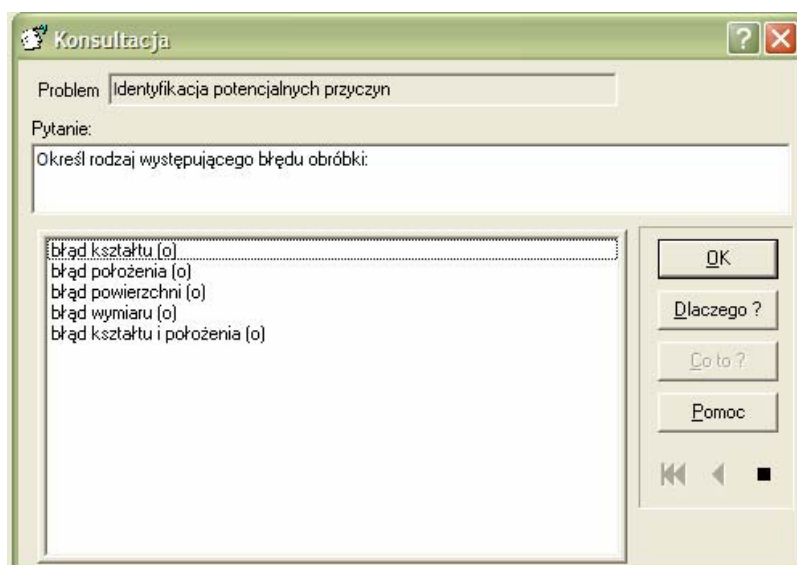
3. Wybór opcji z górnego menu: *Identyfikacja potencjalnych przyczyn*.

Zaproponowany, przykładowy system ekspertowy wypełniony został informacjami ogólnymi, dotyczącymi wszystkich sposobów obróbki skrawaniem, a także informacjami specyficznymi, dotyczącymi jednego ze sposobów obróbki – wiercenia. Może on zostać rozbudowany o dalsze informacje, pozwalające identyfikować przyczyny błędów obróbki charakterystycznych dla poszczególnych typów obróbki skrawaniem (m.in. zawarte w Załączniku A). W obecnej postaci, program w górnym menu posiada trzy opcje:

- *Wszystkie sposoby obróbki skrawaniem* – umożliwia przejście do wnioskowania na temat uniwersalnych potencjalnych przyczyn błędów obróbki.
- *Wiercenie* – umożliwia przejście do wnioskowania na temat potencjalnych przyczyn błędów obróbki, specyficznych dla wiercenia.
- *Wyjście* – zakończenie pracy z programem.

4. Wnioskowanie.

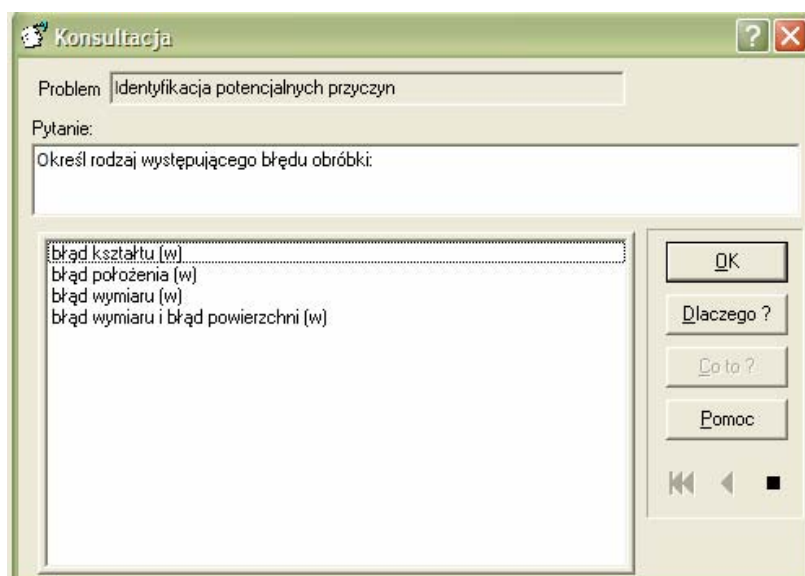
W wyniku wybrania pierwszej lub drugiej opcji z górnego menu, pojawia się okno konsultacji, w którym znajduje się polecenie: „Określ rodzaj występującego błędu obróbki” oraz możliwe do wyboru odpowiedzi (Rysunki 4.10 i 4.11).



Rys.4.10. Okno konsultacji opracowanego systemu ekspertowego *Identyfikacja potencjalnych przyczyn błędów obróbki skrawaniem* w programie PC-Shell – dla opcji „Wszystkie sposoby obróbki skrawaniem”

Źródło:

opracowany system ekspertowy *Identyfikacja potencjalnych przyczyn błędów obróbki skrawaniem* (PC-Shell)



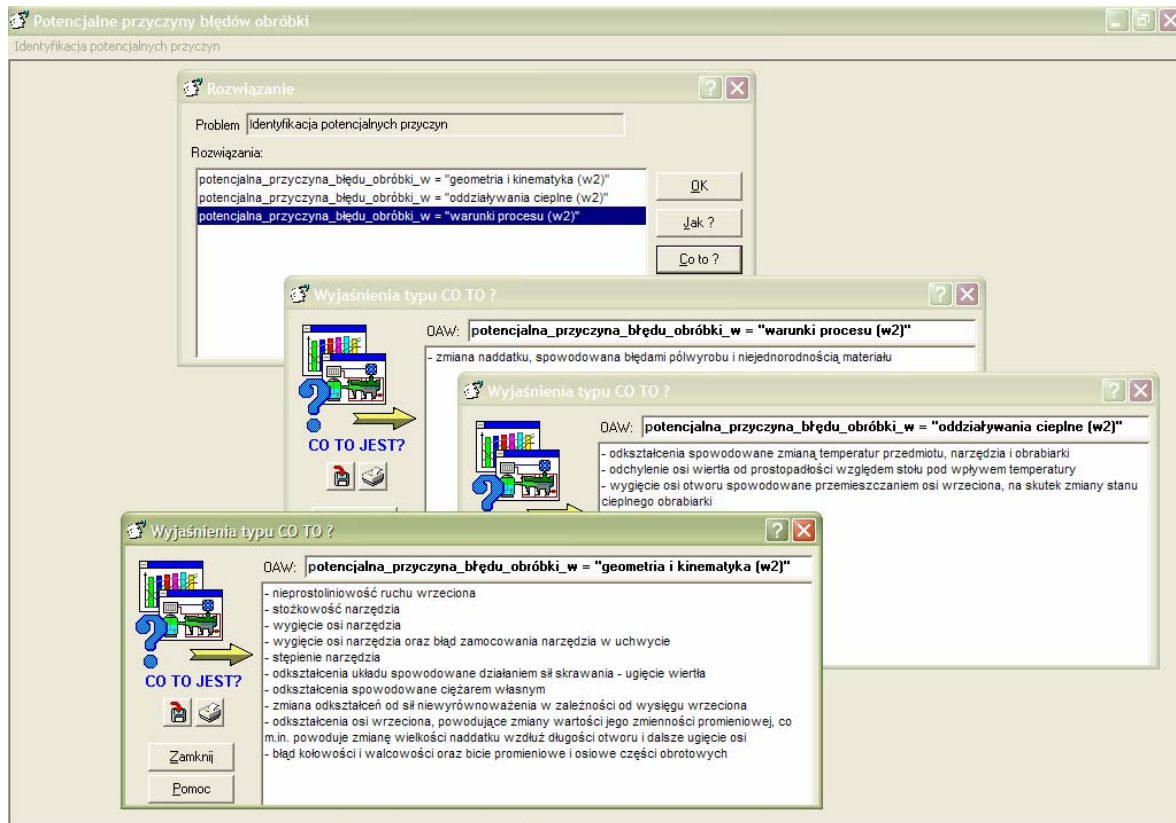
Rys.4.11. Okno konsultacji opracowanego systemu ekspertowego *Identyfikacja potencjalnych przyczyn błędów obróbki skrawaniem* w programie PC-Shell – dla opcji „Wiercenie”

Źródło:

opracowany system ekspertowy *Identyfikacja potencjalnych przyczyn błędów obróbki skrawaniem* (PC-Shell)

Wybór niektórych z ogólnych kategorii błędów obróbki (np. błąd kształtu) umożliwia w kolejnym oknie bardziej szczegółowy wybór rodzaju błędu (np. nieokrągłość, niewalcowość) – zgodnie z danymi zawartymi w tabeli w Załączniku A. Po wyborze rodzaju

błędu i naciśnięciu przycisku „OK” pojawia się okno rozwiązania. Odpowiedzi sformułowane są w postaci zdefiniowanych wcześniej (patrz Rys. 4.6) ogólnych kategorii przyczyn błędów obróbki. Dla każdej odpowiedzi, podświetlonej w danej chwili, można – klikając w przycisk „Co to?” – uruchomić wyjaśnienie, które pojawi się w nowym oknie (Rysunek 4.12). Wyjaśnienie zawiera listę potencjalnych przyczyn danego błędu obróbki w ramach wybranej kategorii przyczyn. Możliwe jest jednoczesne otwarcie kilku okien wyjaśnienia.



Rys.4.12. Opracowany system ekspertowy *Identyfikacja potencjalnych przyczyn błędów obróbki skrawaniem* w programie PC-Shell, z otwartymi oknami wyjaśnienia, zawierającymi potencjalne przyczyny wybranego błędu obróbki

Źródło:

opracowany system ekspertowy *Identyfikacja potencjalnych przyczyn błędów obróbki skrawaniem* (PC-Shell)

5. Zakończenie pracy z programem – odbywa się przez zamknięcie głównego okna programu lub wybór opcji *Wyjście* z górnego menu.

4.5.3. Przygotowanie do analizy wpływu potencjalnych przyczyn na powstający błąd obróbki

Po wygenerowaniu zbioru potencjalnych przyczyn błędu obróbki skrawaniem, występującego w analizowanym procesie (przy użyciu *Zestawienia potencjalnych przyczyn błędów obróbki skrawaniem*, w formie tabeli zawartej w Załączniku A lub systemu ekspertowego – Załącznik B), kolejnym działaniem, w ramach *Analizy zmienności naturalnej procesu* (etap trzeci opracowanej metodyki) jest wstępny wybór najbardziej prawdopodobnych przyczyn z wygenerowanego zbioru (patrz Rysunek 4.5). Aby ułatwić przeprowadzenie oceny i wyboru, uzyskany zbiór potencjalnych przyczyn analizowanego

problemu, może zostać przedstawiony w postaci wykresu przyczynowo-skutkowego (Ishikawy).

Krok polegający na wstępnym wyborze najbardziej prawdopodobnych przyczyn wymaga użycia posiadanej wiedzy technologicznej oraz istniejącej wiedzy procesowej, w celu ogólnej weryfikacji wstępnie zidentyfikowanych potencjalnych przyczyn, poprzez:

- Wyeliminowanie przyczyn nie mających zastosowania w badanym procesie, biorąc pod uwagę charakteryzujące go warunki;
- Ewentualny wybór przyczyn najbardziej prawdopodobnych (na podstawie wstępnej, ogólnej oceny), które – biorąc pod uwagę istniejącą wiedzę procesową – powinny być poddane analizie w pierwszej kolejności;

Krok wstępnego wyboru najbardziej prawdopodobnych przyczyn może mieć zastosowanie szczególnie w sytuacji, gdy wśród potencjalnych przyczyn znajdują się takie, dla których sprawdzenie ich wpływu na powstawanie występującego błędu obróbki jest – z powodów obiektywnych – znacząco trudniejsze niż dla pozostałych przyczyn. Do takich powodów można zaliczyć przede wszystkim zbyt duże nakłady (czasowe, finansowe), potrzebne na przeprowadzenie odpowiedniej analizy. W takiej sytuacji, jeśli w zbiorze prawdopodobnych przyczyn istnieją przyczyny uważane za przynajmniej tak samo (lub bardziej) prawdopodobne, mogą one zostać wytypowane do badania jako pierwsze. Jeżeli wynik takich analiz nie da satysfakcjonującego rezultatu, wtedy powrót do przyczyn uznanych w tym kroku za „trudne” do analizy może okazać się koniecznością.

W kolejnym kroku tego etapu metodyki, dla każdej z potencjalnych przyczyn, które zostały wytypowane do dalszego badania, określone są – przy znacznym wykorzystaniu wiedzy technologicznej oraz istniejącej wiedzy procesowej – sposoby sprawdzenia wpływu każdej z potencjalnych przyczyn na powstający błąd obróbki. Przy planowaniu dalszych analiz należy pamiętać również o uwzględnieniu ewentualnych zidentyfikowanych w badanym procesie strumieni produkcji, których istnienie może mieć istotny wpływ na osiągnięty wynik procesu.

W oparciu o utworzony w ten sposób wstępny plan analiz, określa się następnie ewentualną potrzebę zebrania dodatkowych danych, które pozwolą na ich przeprowadzenie. Jeśli istnieje taka potrzeba, na tym etapie należy ponownie przeprowadzić procedurę zbierania danych, w sposób podobny jak miało to miejsce w drugim etapie metodyki (Zebranie danych dotyczących zmiennej wyjściowej Y). Opracowany plan zbierania danych powinien uwzględniać potencjalne przyczyny powstającego błędu obróbki, które zostały przeznaczone do analizy. Jeżeli dane mają być zbierane przy użyciu innego niż wcześniej systemu pomiarowego, bądź też mierzone będą inne niż w poprzednim etapie charakterystyki wyjściowe, konieczne jest przeprowadzenie ponownej analizy systemu pomiarowego. Dopiero po upewnieniu się, że zmienność wnoszona przez stosowany system pomiarowy jest odpowiednio mała w odniesieniu do zmienności badanej cechy, zbierane przy jego wykorzystaniu dane mogą służyć do dalszych analiz.

Jeśli w tym etapie zebrane zostały dodatkowe dane opisujące analizowany problem, kolejnym krokiem działania, przed przystąpieniem do dalszych analiz, powinno być ponowne sprawdzenie stabilności badanego procesu. Jest to szczególnie ważne w przypadku, gdy od poprzedniego sprawdzenia minęła znaczna ilość czasu, podczas którego w procesie mogły zajść istotne zmiany. Sprawdzenie stabilności procesu jest konieczne przed przystąpieniem do dalszych analiz, albowiem opracowana metodyka przeznaczona jest do redukcji zmienności naturalnej procesu. Dlatego, w celu zapewnienia skuteczności dalszych działań, wykrycie

i usunięcie ewentualnych przyczyn specjalnych zmienności musi nastąpić przed przejściem do kolejnych kroków metodyki.

W kolejnych dwóch krokach opracowanej metodyki, w oparciu o zebrane dane, dokonywana jest analiza przeznaczonych do badania potencjalnych przyczyn występującego błędu obróbki. Proces analizy podzielono na dwie fazy i zastosowano metodę eliminacji, zgodnie z którą po pierwszej fazie analizy część potencjalnych przyczyn może zostać odrzucona i tylko te uznane w dalszym ciągu za prawdopodobne objęte są drugą fazą analizy. Podział zasadniczego procesu analizy na dwie fazy opiera się na koncepcji tzw. Eksploracyjnej analizy danych (ang. *Exploratory Data Analysis*, EDA), nazywanej także Wstępną analizą danych (Aczel, 2000, s.48-54), która stworzona została przez Johna Tukey. Tukey (1980) podkreślał istotność EDA jako wstępnego etapu badania zebranych danych w celu generowania hipotez i konieczność rozróżnienia tego etapu od stosowanych zazwyczaj metod i narzędzi statystycznych przeznaczonych do testowania wygenerowanych hipotez, które nazywane są metodami Konfirmacyjnej analizy danych (ang. *Confirmatory Data Analysis*). W ramach Eksploracyjnej analizy danych zastosowanie znajduje wiele prostych metod i narzędzi graficznych, natomiast Konfirmacyjna analiza danych opiera się na wykorzystaniu bardziej zaawansowanych metod, takich jak np. różnego rodzaju testy statystyczne, w celu uzyskania potwierdzenia prawdziwości wcześniej utworzonych hipotez. Koncepcję podziału badania na eksploracyjną i konfirmacyjną analizę danych wykorzystano w opracowanej metodyce, proponując podział zasadniczego procesu analizy na dwie fazy:

- Wstępną analizę potencjalnych przyczyn problemu – w ramach której zastosowanie prostych narzędzi graficznych pozwoli na wyłonienie prawdopodobnych przyczyn analizowanego problemu, formułując tym samym wstępne hipotezy;

oraz

- Dalszą analizę prawdopodobnych przyczyn – w ramach której sformułowane w poprzednim kroku hipotezy zostaną zweryfikowane przy użyciu bardziej zaawansowanych narzędzi statystycznych.

4.5.4. Wstępna analiza wybranych potencjalnych przyczyn

Każda z wybranych wcześniej, przeznaczonych do zbadania, potencjalnych przyczyn powstającego błędu obróbki podlega wstępnej analizie przeprowadzanej w kolejnym kroku metodyki. Analiza ta odbywa się na bazie prostego algorytmu, pozwalającego na wybór odpowiedniego narzędzia statystycznego (patrz Rysunek 4.5). Na potrzeby wstępnej analizy, do zastosowania w opracowanej metodyce wybrano proste narzędzia graficzne, takie jak:

- Wykres rozproszenia – pozwalający ocenić czy pomiędzy dwiema badanymi zmiennymi, np. potencjalną przyczyną i mierzoną charakterystyką wyjściową procesu, istnieje zależność (patrz np.: Pyzdek, 2001, s.284-289);
- Wykres punktowy, wykres pudełkowy – pozwalające porównać kilka zbiorów danych, np. dane charakteryzujące różne poziomy badanych czynników, czy różne strumienie produkcji (patrz np.: Pyzdek, 2001, s.327-329; Breyfogle, 2003, s.389; Thompson i Koronacki, 1994, s.174-179);
- Wykres Multi-vari – ułatwiający identyfikację czynników mających największy wpływ na zmienność charakterystyki wyjściowej procesu (patrz np.: Breyfogle, 2003, s.386-388).

Narzędzia dostępne podczas analizy przyczyn problemu wybierane są przy użyciu kryterium właściwego dla narzędzi statystycznych, jakim jest rodzaj posiadanych danych (Bertels, 2003, s.205; Perry i Barker, 2006). W przypadku omawianej fazy, kryterium to wynika z faktu, że dane dotyczące potencjalnych przyczyn powstającego błędu obróbki mogą mieć postać danych ciągłych (mierzona wartość), lub danych dyskretnych (np. poszczególne poziomy rozpatrywanego potencjalnego czynnika, poszczególne strumienie produkcji).

Po przeprowadzeniu wstępnej analizy, dla wszystkich z przeznaczonych do zbadania potencjalnych przyczyn powstającego błędu obróbki, zgodnie z algorytmem zawartym w tym kroku metodyki, dokonywane jest podsumowanie przeprowadzonych analiz. W podsumowaniu tym, oprócz wyników zastosowania wskazanych w metodyce metod i narzędzi, istotną rolę odgrywać powinno wykorzystanie posiadanej wiedzy technologicznej oraz wiedzy procesowej. Dopiero takie połączenie umożliwi właściwą interpretację otrzymanych wyników analizy i ich podsumowanie. Na tej podstawie możliwe może się okazać wyeliminowanie niektórych ze zbadanych przyczyn – takich, dla których wstępna analiza wykazuje brak wpływu lub pomijalnie mały wpływ na mierzoną charakterystykę wyjściową. Pozostałe, nie wyeliminowane w tej fazie analizy przyczyny zostają uznane za prawdopodobne i podlegają dalszej analizie w kolejnym kroku metodyki.

Jeżeli natomiast, na podstawie przeprowadzonej wstępnej analizy potencjalnych przyczyn, żadna z badanych przyczyn nie zostanie uznana za mającą istotny wpływ na powstający błąd obróbki, możliwe są dwie drogi postępowania:

- Powrót do identyfikacji potencjalnych przyczyn, przy ewentualnym dodatkowym wsparciu procesu generowania zbioru potencjalnych przyczyn poprzez wykorzystanie metody burzy mózgów, w celu poszerzenia zbioru potencjalnych przyczyn problemu.
- Powrót do początku etapu *Szczegółowej analizy stanu procesu*, w celu ponownego zdefiniowania tła problemu.

4.5.5. Dalsza analiza prawdopodobnych przyczyn

Kolejny krok opracowanej metodyki obejmuje analizę przyczyn, których wpływ na powstający błąd obróbki, po przeprowadzeniu wstępnej analizy, uznany został za prawdopodobny. Na potrzeby dalszej, potwierdzającej analizy, do zastosowania w opracowanej metodyce wybrano takie narzędzia statystyczne jak:

- Analizę korelacji (ewentualnie także analizę regresji) – pozwalającą zweryfikować hipotezę o istnieniu zależności pomiędzy dwoma badanymi zmiennymi, np. prawdopodobną przyczyną i mierzoną charakterystyką wyjściową procesu (patrz np.: Brandt, 1998, s.474-489; Aczel, 2000, s.456-512; Pyzdek, 2001, s.552-567; Breyfogle, 2003, s.484-499);
- Analizę wariancji ANOVA – umożliwiającą weryfikację hipotezy o równości średnich kilku zbiorów danych (patrz np.: Brandt, 1998, s.456-473; Aczel, 2000, s.388-421; Pyzdek, 2001, s.511-516; Breyfogle, 2003, s.500-510 oraz s.524-532);
- Test t Studenta – pozwalający zweryfikować hipotezę o równości średnich dwóch zbiorów danych (patrz np.: Brandt, 1998, s.263-268);
- Testy pozwalające porównać mediany różnych zbiorów danych – np. test Mood'a i test Kruskala-Wallisa (patrz np.: Aczel, 2000, s.731-735; Breyfogle, 2003, s.518-520);
- Planowanie eksperymentów (DoE) – pozwalające, w sposób proaktywny, zbadać wpływ wielu czynników na mierzoną charakterystykę wyjściową; Tematyka Planowania eksperymentów jest bardzo rozległa, a szczegóły dotyczące planowania

i przeprowadzania eksperymentów zgodnie z metodyką DoE szeroko opisywane w literaturze (np. Montgomery, 1991; Breyfogle, 2003, s.549-666). Istnieje kilka różnych podejść do planowania eksperymentów, a porównanie tych podejść i proponowane kryteria doboru odpowiedniego podejścia przedstawiają m.in. Antony (2006); Baranowicz *et al.* (2006).

W ramach fazy dalszej analizy prawdopodobnych przyczyn, dobór odpowiednich metod i narzędzi statystycznych jest jasno określony za pomocą zastosowanych kryteriów, które obejmują:

- liczbę potencjalnych przyczyn, które mają zostać przeanalizowane,
- rodzaj dostępnych danych (podobnie jak w przypadku poprzedniej fazy analizy),
- rodzaj teoretycznego rozkładu prawdopodobieństwa, jakim może być modelowana mierzona charakterystyka wyjściowa,
- równość wariancji analizowanych grup danych, która może zostać sprawdzona np. za pomocą testu F-Fischera (patrz np.: Brandt, 1998, s.259-263).

Algorytm postępowania w ramach omawianego kroku metodyki przedstawiony został na Rysunku 4.5.

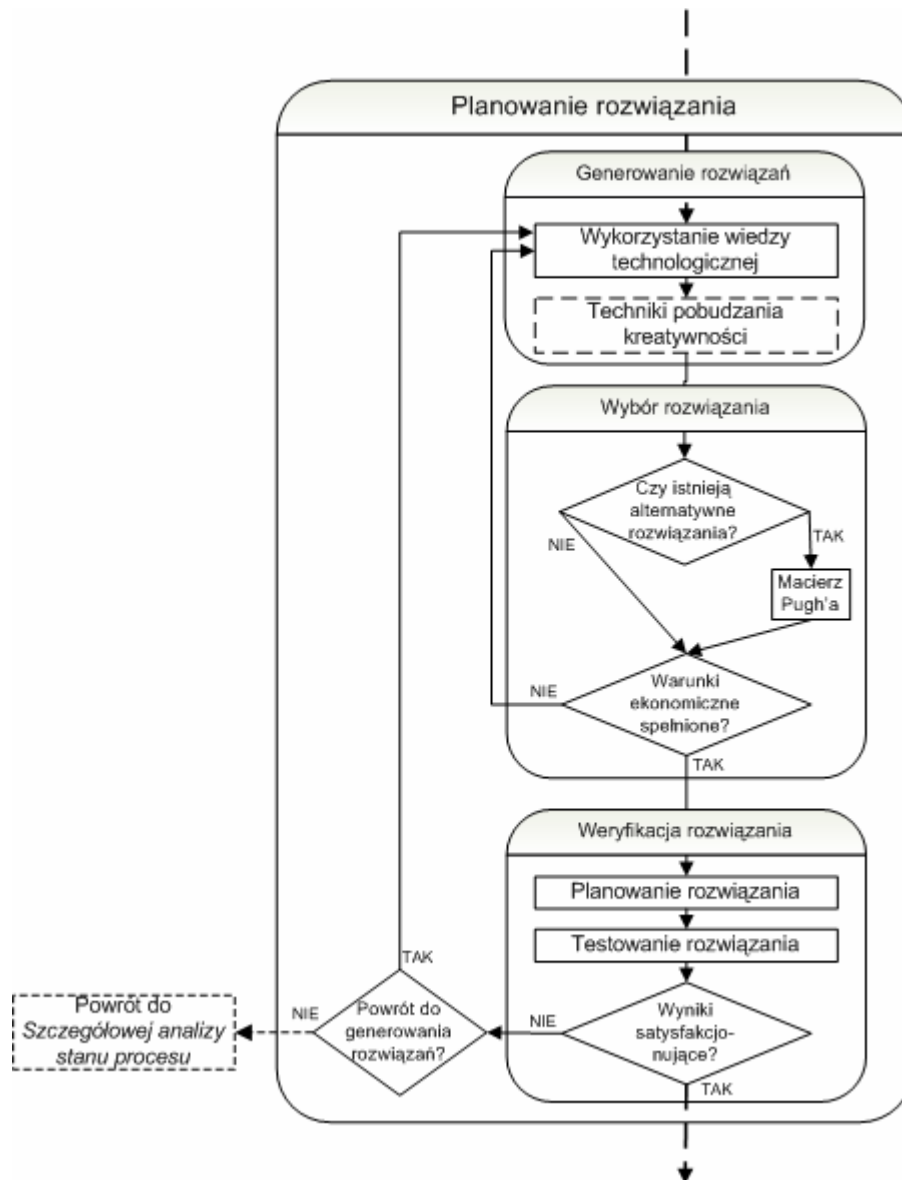
Po przeprowadzeniu dalszej, potwierdzającej analizy dla wszystkich zidentyfikowanych prawdopodobnych przyczyn powstającego błędu obróbki, zgodnie z algorytmem zawartym w tym kroku metodyki, dokonywane jest podsumowanie przeprowadzonych analiz. W podsumowaniu tym, tak jak w pierwszej fazie analizy, oprócz wyników przeprowadzonych badań i testów, ważne jest wykorzystanie posiadanej wiedzy technologicznej oraz wiedzy procesowej, w celu dokonania odpowiedniej interpretacji otrzymanych wyników analiz i ich podsumowania. W oparciu o przeprowadzone podsumowanie, możliwe może się okazać dalsze wyeliminowanie niektórych ze zbadanych przyczyn – takich, dla których dalsza analiza nie potwierdziła ich istotnego wpływu na mierzoną charakterystykę wyjściową. W efekcie, możliwe powinno być zidentyfikowanie najbardziej prawdopodobnej przyczyny (lub przyczyn) powstającego błędu obróbki.

Jeżeli jednak, na podstawie przeprowadzonej analizy prawdopodobnych przyczyn, wpływ żadnej z badanych przyczyn na powstający błąd obróbki nie zostanie potwierdzony jako istotny, możliwe są (podobnie jak po poprzedniej fazie analiz) dwie drogi postępowania:

- Powrót do identyfikacji potencjalnych przyczyn, przy ewentualnym dodatkowym wsparciu procesu generowania zbioru potencjalnych przyczyn wykorzystując metodę burzy mózgów, w celu poszerzenia zbioru potencjalnych przyczyn problemu.
- Powrót do początku etapu *Szczegółowej analizy stanu procesu*, w celu ponownego zdefiniowania tła problemu.

4.6. Etap IV: Planowanie rozwiązania

W przypadku, gdy – w wyniku przeprowadzonej analizy zmienności naturalnej procesu – możliwe było zidentyfikowanie najbardziej prawdopodobnej przyczyny (lub przyczyn) powstającego błędu obróbki, kolejne działania obejmują realizację następnego, czwartego etapu opracowanej metodyki, jakim jest *Planowanie rozwiązania* (Rysunek 4.13).



Rys.4.13. Czwarty etap *Metodyki redukcji zmienności procesów obróbki skrawaniem* – Planowanie rozwiązania

Źródło: opracowanie własne

Pierwszym krokiem podejmowanym w ramach tego etapu jest generowanie rozwiązań analizowanego problemu (przy wykorzystaniu wiedzy wyniesionej z etapu analizy zmienności naturalnej procesu), które mają przyczynić się do redukcji tej zmienności. Korzystnym jest, o ile to możliwe, zaproponowanie kilku alternatywnych rozwiązań, aby zwiększyć prawdopodobieństwo, że zastosowane zostanie możliwie najlepsze rozwiązanie problemu. Generowanie rozwiązań odbywać się powinno przede wszystkim w oparciu o odpowiednią wiedzę technologiczną. Użytecznym źródłem takiej wiedzy jest opracowane *Zestawienie potencjalnych przyczyn błędów obróbki skrawaniem*, a szczególnie kolumna 6. tabeli zawartej w Załączniku A, w której umieszczono informacje na temat „podprzyczyn” danej przyczyny błędu obróbki, a także dodatkowe uwagi, mogące pomóc w identyfikacji odpowiedniego rozwiązania danego problemu. Tak zebrana wiedza może być stale uzupełniana, dzięki czemu może stanowić coraz pełniejszy zbiór informacji przydatnych zarówno przy identyfikacji potencjalnych przyczyn błędów obróbki, jak i przy generowaniu rozwiązań tego typu problemów.

Oprócz wiedzy technologicznej, jako swego rodzaju „katalizator”, w procesie generowania rozwiązań wykorzystane mogą zostać (opcjonalnie) różnego rodzaju techniki pobudzania kreatywności (patrz np. De Bono, 2008), dzięki którym zbiór zidentyfikowanych potencjalnych rozwiązań problemu może być powiększony.

Kolejnym krokiem etapu planowania rozwiązania jest wybór rozwiązania, które ma zostać przeznaczone do ostatecznej weryfikacji. W przypadku gdy wygenerowano kilka potencjalnych rozwiązań, do wyboru jednego z nich wykorzystana może zostać tzw. macierz Pugh'a (patrz np.: El-Haik i Roy, 2005, s.177-180; Silverstein *et al.*, 2009, s.212-216), która pozwala na porównanie wszystkich potencjalnych rozwiązań, biorąc pod uwagę stopień spełnienia przez każde z nich określonych kryteriów. Następnie, rozwiązanie uznane w ten sposób za najlepsze z zaproponowanych, powinno zostać poddane weryfikacji pod względem ekonomicznym. Sprawdzenie czy wytypowane rozwiązanie spełnia podstawowe warunki ekonomiczne pozwoli zapewnić, że jego wprowadzenie będzie korzystne finansowo dla przedsiębiorstwa.

Dopiero po tak przeprowadzonej wstępnej ocenie rozwiązania, następuje przejście do jego weryfikacji w warunkach rzeczywistych. Weryfikacja przebiegać powinna w trzech etapach:

- Zaplanowanie rozwiązania, biorąc pod uwagę warunki rzeczywiste danego procesu,
- Przetestowanie rozwiązania w warunkach rzeczywistych danego procesu,
- Ocena uzyskanych wyników, poprzez porównanie wyników ponownie przeprowadzonej analizy zdolności procesu (oraz, ewentualnie, zidentyfikowanych „strumieni produkcji”) z wynikami sprzed wprowadzenia rozwiązania, a także weryfikacja osiągnięcia ustalonego (w drugim etapie metodyki) celu doskonalenia.

Jeżeli wyniki przeprowadzonej weryfikacji rozwiązania są satysfakcjonujące, a więc zidentyfikowane rozwiązanie przyczyniło się do istotnej redukcji zmienności naturalnej analizowanego procesu, następuje przejście do kolejnego etapu metodyki. Natomiast w przypadku, gdy wyniki weryfikacji nie przyniosły zadowalających rezultatów, możliwe są dwie drogi postępowania:

- Powrót do etapu generowania rozwiązań i ponowne rozpatrzenie możliwości identyfikacji alternatywnych rozwiązań analizowanego problemu, w celu poszerzenia zbioru potencjalnych rozwiązań problemu.
- Powrót do początku etapu Szczegółowej analizy stanu procesu, w celu ponownego zdefiniowania tła problemu.

4.7. Etap V: Wdrożenie rozwiązania

Jeżeli zidentyfikowane w poprzednim etapie metodyki rozwiązanie pomyślnie przeszło weryfikację, następuje przejście do ostatniego etapu opracowanej metodyki, czyli *Wdrożenia rozwiązania* (Rysunek 4.14).

Na tym etapie, pozytywnie zweryfikowane rozwiązanie powinno zostać w pełni wdrożone w standardowy tok procesu. W procesie wdrożenia bardzo istotny jest element utrzymania zmian, który powinien zostać uwzględniony poprzez:

- Standaryzację wdrożonego rozwiązania, aby zapewnić, że stanie się ono trwałym sposobem działania;
- Wprowadzenie lub odpowiednią aktualizację planów kontroli procesu, aby umożliwić monitorowanie jego dalszego przebiegu, uwzględniając wdrożone rozwiązanie (patrz np.: Breyfogle, 2003, s.709-710).



Rys.4.14. Piąty etap *Metodyki redukcji zmienności procesów obróbki skrawaniem* – Wdrożenie rozwiązania

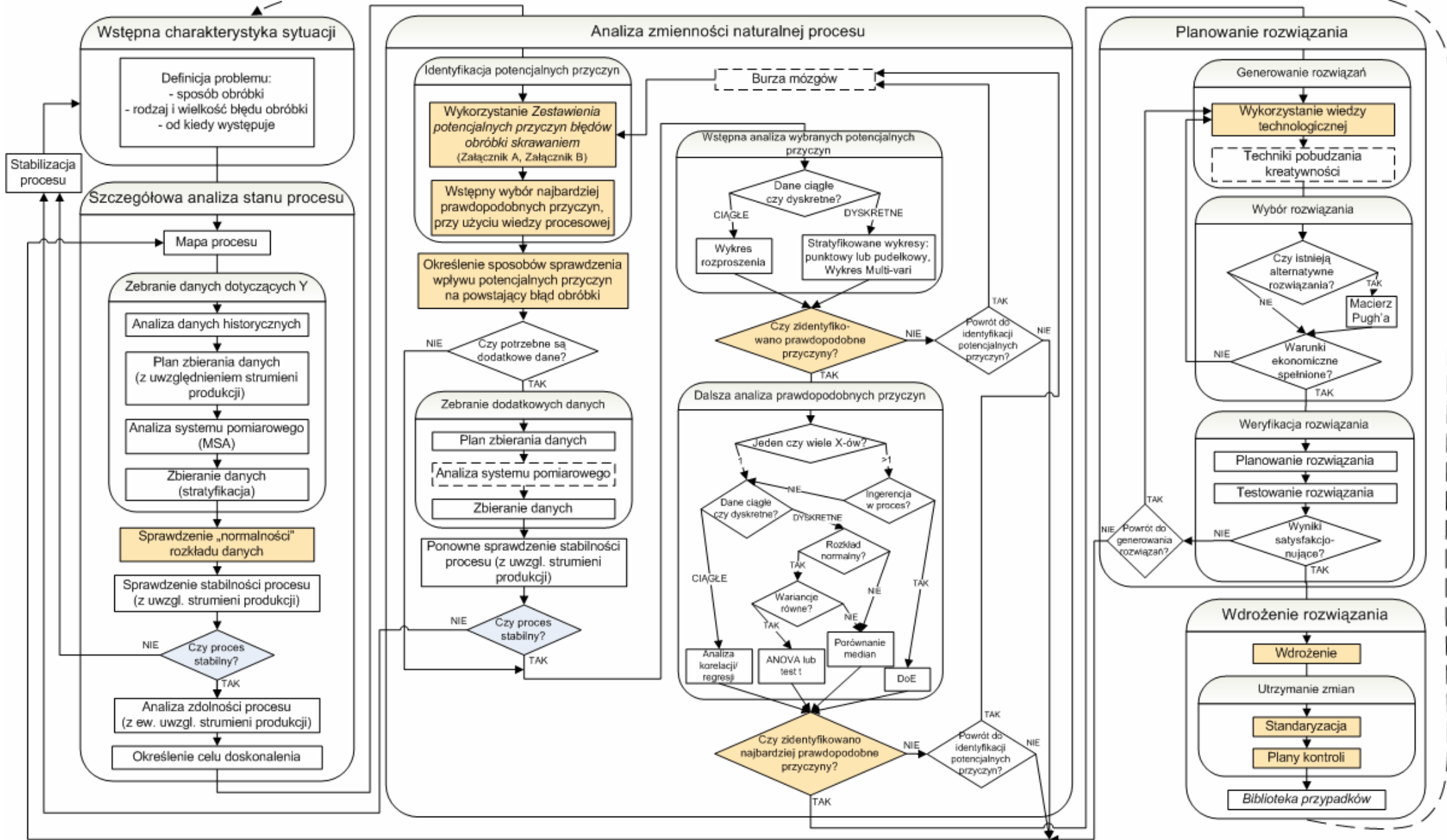
Źródło: opracowanie własne

Wskazane jest także rozważenie ewentualnej możliwości wykorzystania tak wypracowanego rozwiązania w celu doskonalenia działania innych obszarów w przedsiębiorstwie – związanych np. z podobnymi procesami, maszynami, wyrobami. Należy jednak przy tym pamiętać, że każdy problem powinien zostać indywidualnie rozważony, a rozwiązanie przeznaczone do wdrożenia musi zostać zweryfikowane w warunkach danego procesu.

Aby zapewnić, że zidentyfikowane, o udowodnionej skuteczności, rozwiązanie analizowanego problemu wzbogaci wiedzę przedsiębiorstwa, w ostatnim kroku opracowanej metodyki zaproponowano dodanie takiego rozwiązania do tzw. *Biblioteki przypadków*, której utworzenie i aktywne utrzymywanie w przedsiębiorstwie jest zalecane. Pozwoli to przedsiębiorstwu stworzyć proste narzędzie zarządzania posiadaną wiedzą procesową, jednocześnie wzbogacając i indywidualizując opracowaną *Metodykę redukcji zmienności procesów obróbki skrawaniem* na potrzeby danego przedsiębiorstwa. Utworzenie takiej *Biblioteki przypadków* jest ułatwione dzięki zaproponowanemu systemowi ekspertowemu (Załącznik B), który pełni rolę nośnika teoretycznej wiedzy technologicznej oraz specyficznej wiedzy procesowej w opracowanej metodyce. Dzięki takiemu rozwiązaniu, przedsiębiorstwo może w sposób świadomy i zorganizowany zarządzać posiadaną wiedzą procesową, która stanowi jego cenny zasób.

Opracowana metodyka, w myśl idei ciągłego doskonalenia, oraz zgodnie z modelem PDSA, powinna przebiegać w formie cyklu. Dlatego, po zakończeniu wdrożenia rozwiązania, działania powinny zostać skierowane na identyfikację kolejnej możliwości doskonalenia. Może ona dotyczyć tego samego zagadnienia – w przypadku, gdy zmienność analizowanego procesu nadal nie znajduje się na optymalnym poziomie, a podejmowanie prób jej dalszego zredukowania jest technologicznie oraz ekonomicznie uzasadnione. Kolejna możliwość doskonalenia może też oczywiście być zidentyfikowana w zupełnie innym obszarze.

Pełny algorytm opracowanej *Metodyki redukcji zmienności procesów obróbki skrawaniem* przedstawiono na Rysunku 4.15.



Rysunek 4.15 Opracowana *Metodyka redukcji zmienności procesów obróbki skrawaniem*
 - kolorem pomarańczowym zaznaczono działania, w których wykorzystywana jest wiedza technologiczna

Źródło: opracowanie własne

4.8. Opracowana Metodyka redukcji zmienności procesów obróbki skrawaniem – podsumowanie

Podsumowując, należy zauważyć, że opracowana *Metodyka redukcji zmienności procesów obróbki skrawaniem* spełnia wszystkie przyjęte założenia, a mianowicie:

- Poszczególne etapy metodyki wpisują się w cykl doskonalenia PDSA, a szczególny nacisk położony jest na analizę problemu, zawartą w etapie Planowania.
- Działania zawarte w metodyce przebiegają zgodnie z zaproponowanym uporządkowanym algorytmu.
- Metodyka obejmuje ściśle określony zbiór wybranych metod i narzędzi, których zastosowanie opiera się na jasno określonych kryteriach.
- Metodyka wymaga zbadania procesu, w celu rozróżnienia zmienności z przyczyn specjalnych od zmienności naturalnej procesu, tak aby zastosowanie metodyki było zgodne z jej przeznaczeniem (którym jest redukcja zmienności naturalnej), co pomoże zapewnić skuteczność podejmowanych działań.
- W metodyce, do opisu i analizy zmienności naturalnej procesu, zastosowano – najbardziej do tego odpowiednie – metody i narzędzia statystyczne.
- Zastosowanie każdej z zawartych w metodyce metod i narzędzi podyktowane jest ustalonym celem, przy czym nacisk położony jest na odpowiednią interpretację wyników tego zastosowania, prowadzącą do wyciągnięcia wniosków w odniesieniu do analizowanego problemu.
- Metodyka opiera się na analizie danych pozyskanych z procesu, a warunkiem przeprowadzenia analiz jest uprzednie potwierdzenie akceptowalności systemu pomiarowego zastosowanego do zebrania danych.
- W metodyce uwzględniono identyfikację i analizę ewentualnych strumieni produkcji, które mogą wchodzić w skład analizowanego procesu.

Ponadto, w opracowanej metodyce, metody i narzędzia doskonalenia pochodzące z obszaru Zarządzania Jakością, połączono z odpowiednią wiedzą technologiczną, dotyczącą w szczególności potencjalnych przyczyn błędów obróbki skrawaniem. Wiedza technologiczna w opracowanej metodyce wykorzystana jest w następujących działaniach:

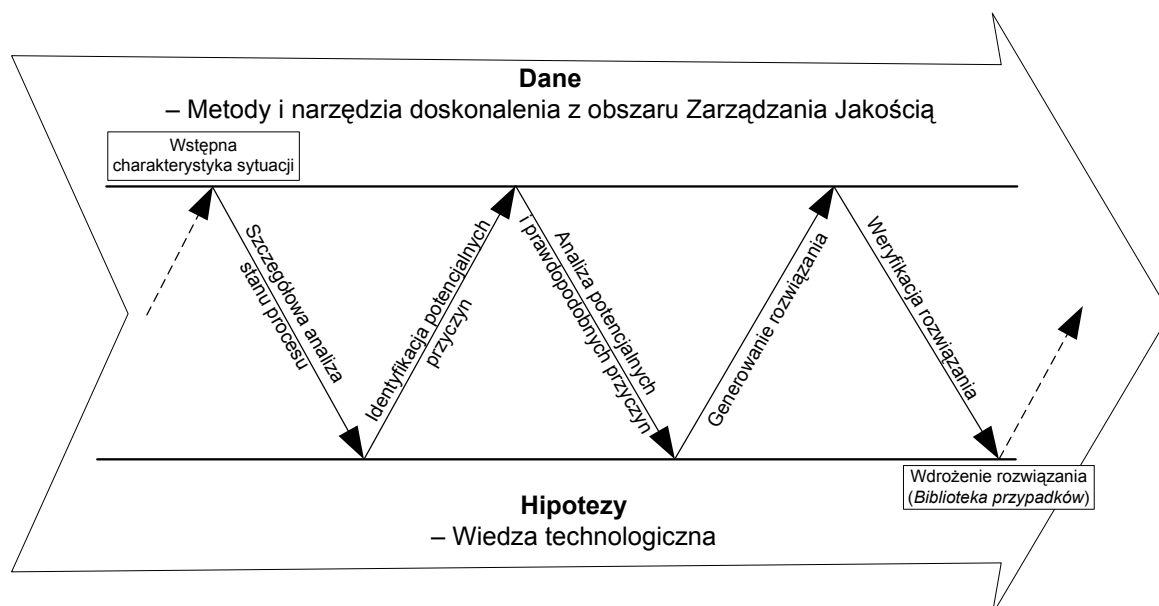
- Sprawdzenie jakim teoretycznym rozkładem prawdopodobieństwa może być modelowana mierzona charakterystyka wyjściowa;
- Identyfikacja potencjalnych przyczyn problemu – poprzez zastosowanie opracowanego *Zestawienia potencjalnych przyczyn błędów obróbki skrawaniem* (w formie tabeli – Załącznik A, oraz w formie zaproponowanego systemu ekspertowego – Załącznik B);
- Wstępny wybór najbardziej prawdopodobnych przyczyn – który opiera się w dużym stopniu na posiadanej wiedzy procesowej i wiedzy technologicznej;
- Określenie sposobów sprawdzenia wpływu potencjalnych przyczyn na powstający błąd obróbki;
- Interpretacja wyników przeprowadzonych analiz – zarówno na etapie wstępnej, jak i dalszej analizy prawdopodobnych przyczyn problemu;
- Generowanie rozwiązania – przy wsparciu zebranych w opracowanym *Zestawieniu potencjalnych przyczyn błędów obróbki skrawaniem* informacji dotyczących ewentualnych „podprzyczyn” danej przyczyny błędu obróbki, a także dodatkowych uwag, mogących pomóc w identyfikacji odpowiedniego rozwiązania danego problemu

(kolumna 6. tabeli zawartej w Załączniku A); przy czym zestawienie to może być uzupełniane w miarę pozyskiwania nowej wiedzy procesowej w organizacji;

- Wdrożenie i utrzymanie rozwiązania – aby zapewnić, że wdrożone rozwiązanie zostanie odpowiednio dostosowane do istniejącego procesu i stanie się jego częścią.

Na Rysunku 4.15, przedstawiającym algorytm opracowanej *Metodyki redukcji zmienności procesów obróbki skrawaniem*, działania w których wykorzystywana jest wiedza technologiczna wyróżniono kolorem pomarańczowym.

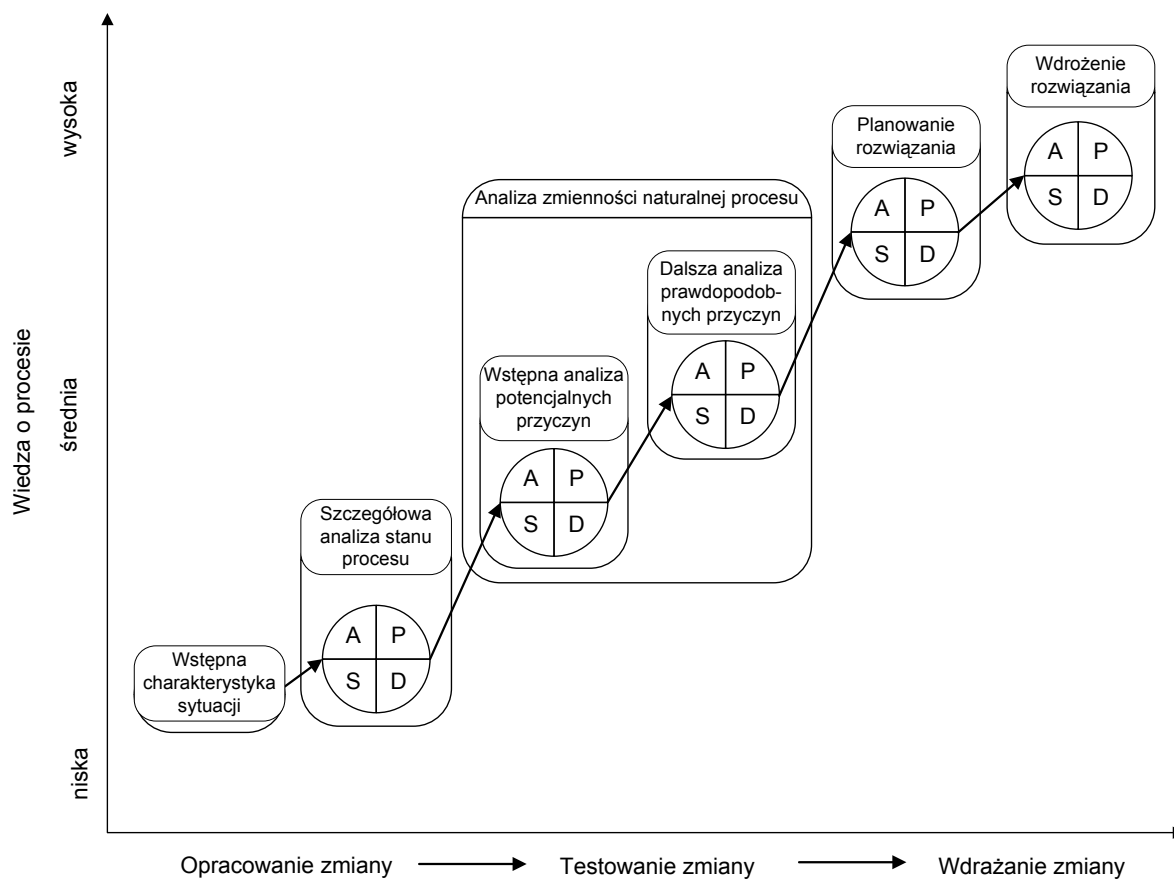
Dzięki połączeniu wiedzy technologicznej z metodami i narzędziami z obszaru Zarządzania Jakością, opracowana *Metodyka redukcji zmienności procesów obróbki skrawaniem* aktywnie przyczynia się do poszerzania posiadanej wiedzy procesowej, zgodnie z omówionym w Rozdziale 1. iteracyjnym procesem zdobywania wiedzy. W tym ujęciu, wiedza technologiczna wspomaga opracowywanie hipotez, natomiast metody i narzędzia z obszaru Zarządzania Jakością pozwalają weryfikować te hipotezy w oparciu o dane pozyskane z procesu (Rysunek 4.16). W ten sposób budowana jest, specyficzna dla danego procesu, wiedza procesowa, która stanowi cenny zasób przedsiębiorstwa.



Rys.4.16. Opracowana *Metodyka redukcji zmienności procesów obróbki skrawaniem* jako iteracyjny proces zdobywania wiedzy

Źródło: opracowanie własne, w oparciu o ideę iteracyjnego procesu zdobywania wiedzy przedstawioną przez Box *et al.*, 1978, s.2

Budowanie wiedzy procesowej, przy wykorzystaniu opracowanej *Metodyki redukcji zmienności procesów obróbki skrawaniem*, odbywa się w sposób sekwencyjny, dzięki czemu każdy etap metodyki przyczynia się do powiększenia zasobu posiadanej wiedzy. Ponadto, niemal każdy z głównych etapów metodyki przebiega zgodnie z podstawowym cyklem doskonalenia PDSA, dzięki czemu cała metodyka ma formę procesu sekwencyjnego budowania wiedzy, zgodnie z ideą „spirali ciągłego doskonalenia” (Rysunek 4.17).



Rys.4.17. Opracowana *Metodyka redukcji zmienności procesów obróbki skrawaniem* jako proces sekwencyjnego budowania wiedzy procesowej

Źródło: opracowanie własne, w oparciu o koncepcję sekwencyjnego budowania wiedzy przedstawioną przez Moen *et al.*, 1999, s.17

Podsumowując, na tym etapie można stwierdzić, że opracowana *Metodyka redukcji zmienności procesów obróbki skrawaniem* spełnia wszystkie postawione założenia i wytyczne odnoszące się do jej struktury. W celu sprawdzenia skuteczności opracowanej metodyki konieczna jest jej weryfikacja, która przedstawiona zostanie w kolejnych rozdziałach pracy.

5. PORÓWNANIE OPRACOWANEJ METODYKI REDUKCJI ZMIENNOŚCI PROCESÓW OBRÓBKII SKRAWANIEM Z PRZEBIEGIEM PROJEKTÓW DOSKONALĄCYCH PRZEPROWADZONYCH ZGODNIE Z INNYM ALGORYTMEM DOSKONALENIA

W celu weryfikacji potencjalnej skuteczności opracowanej *Metodyki redukcji zmienności procesów obróbki skrawaniem*, porównano przebieg rzeczywistych projektów doskonalących przeprowadzanych w przedsiębiorstwach z przebiegiem procesu doskonalenia zgodnym z zaproponowaną metodyką. Do porównania wybrano dwa projekty przeprowadzane zgodnie z algorytmem DMAIC (wywodzącym się z podejścia Six Sigma), pochodzące z dwóch różnych przedsiębiorstw.

5.1. Projekt A

Projekt A, realizowany w przedsiębiorstwie X:

- Dotyczył procesu toczenia pierścieni ślizgowych wirnika alternatora.
- Problem wykryto w wyniku pojawiających się reklamacji wpływających od klienta.
- Projekt doskonalący rozpoczęto po 3 miesiącach od momentu pojawienia się problemu.
- Analiza zdolności procesu wykazała, że zdolność procesu związana z mierzoną charakterystyką krytyczną dla jakości (bicie) była na poziomie $C_{pk} = 0,68$.
- Przekroczenia dopuszczalnego bicia zdarzały się regularnie i spowodowały wprowadzenie do procesu 100% kontroli oraz dodatkowej operacji w celu poprawiania wyrobów, których charakterystyka krytyczna przekraczała granice specyfikacji.
- W wyniku przeprowadzonych działań, sprawdzeń i analiz, jako główną przyczynę problemu zidentyfikowano zastosowanie niewłaściwego uchwytu mocującego przedmiot obrabiany na obrabiarce.
- Po wprowadzeniu nowego uchwytu, zdolność procesu ukształtowała się na poziomie $C_{pk} = 1,66$.
- Projekt trwał 12 miesięcy.

W Tabeli 5.1 przedstawiono przebieg przeprowadzonego w ramach Projektu A procesu doskonalenia i zestawiono go z przebiegiem projektu zgodnym z opracowaną *Metodyką redukcji zmienności procesów obróbki skrawaniem*.

Tabela 5.1. Porównanie działania opracowanej metodyki z przebiegiem projektu A

Przebieg przeprowadzonego projektu doskonalącego	Przebieg projektu doskonalącego zgodny z opracowaną metodyką (patrz Rys.4.15)
1. <u>Zdefiniowanie</u> - sposób obróbki - rodzaj i wielkość błędu obróbki - okres występowania problemu	1. <u>Wstępna charakterystyka sytuacji</u> - sposób obróbki - rodzaj i wielkość błędu obróbki - od kiedy występuje?
2. <u>Pomiar</u> - zebrano dane dotyczące krytycznej charakterystyki (Y) – bicia – bez uwzględnienia stratyfikacji - obliczono zdolność procesu ($C_{pk} = 0,68$) - ustalono cel projektu (min. $C_{pk} = 1,66$)	2. <u>Szczegółowa analiza stanu procesu</u> - mapa procesu - zebranie danych dotyczących Y: ✓ ew. dane historyczne – weryfikacja aktualności, licznosci oraz wiarygodności (MSA)

	<ul style="list-style-type: none"> ✓ plan zbierania aktualnych danych (z uwzględnieniem ewentualnych zidentyfikowanych strumieni produkcji) ✓ analiza systemu pomiarowego (MSA) ✓ zebranie aktualnych danych (stratyfikacja) - sprawdzenie „normalności” rozkładu danych - sprawdzenie stabilności procesu (z uwzgl. strumieni produkcji) -> ew. stabilizacja procesu - analiza zdolności procesu (z ewentualnym uwzględnieniem strumieni produkcji) - ustalenie celu doskonalenia.
<p>3. Analiza</p> <ul style="list-style-type: none"> - sporządzono diagram SIPOC dla analizowanego procesu - przeprowadzono burzę mózgów - kilkanaście zidentyfikowanych potencjalnych przyczyn problemu pogrupowano na wykresie Ishikawy - wytypowano kilka potencjalnych przyczyn problemu do przetestowania - zebrano dodatkowe dane dotyczące potencjalnych przyczyn problemu - wykonano wykresy rozproszenia oraz analizy korelacji i regresji dla sprawdzenia związku wytypowanych potencjalnych przyczyn problemu z wielkością wyjściową (biciem) - żadna z analiz nie pomogła zidentyfikować prawdziwej przyczyny powstawania analizowanego błędu obróbki - ponownie przeprowadzono burzę mózgów, skorzystano z wiedzy ekspertów - zidentyfikowano dodatkowe potencjalne przyczyny występującego błędu obróbki - zaplanowano i przeprowadzono dodatkowe testy: <ul style="list-style-type: none"> ✓ sprawdzenie czy dany błąd obróbki występuje dla innych elementów wyrobu ✓ sprawdzenie powtarzalności systemu mocowania przedmiotu obrabianego na obrabiarce. <p>W wyniku przeprowadzonych testów, jako główną przyczynę problemu zidentyfikowano zastosowanie niewłaściwego uchwytu mocującego przedmiot obrabiany na tokarce.</p>	<p>3. Analiza zmienności naturalnej procesu</p> <p>a) <u>Identyfikacja potencjalnych przyczyn</u></p> <ul style="list-style-type: none"> - skorzystanie z <i>Zestawienia potencjalnych przyczyn błędów obróbki skrawaniem</i> (Załącznik A): Błąd „bicia” – jako błąd złożony położenia i kształtu – zgodnie z zestawieniem może być spowodowany: <ul style="list-style-type: none"> o błędami zamocowania przedmiotu o błędami geometrycznymi obrabiarki, takimi jak: błędy ułożyskowania wrzeciona i błędy prostoliniowości prowadnic. - wybór najbardziej prawdopodobnych przyczyn przy użyciu wiedzy procesowej <p>b) <u>Określenie sposobów sprawdzenia wpływu potencjalnych przyczyn na powstający błąd obróbki</u></p> <p>c) <u>Zebranie dodatkowych danych</u></p> <p>Jeśli zebrane dotychczas dane okazałyby się niewystarczające do celu sprawdzenia wpływu zidentyfikowanych potencjalnych przyczyn na powstający błąd obróbki, należałoby zebrać dodatkowe dane, a także przeprowadzić:</p> <p>d) <u>Ponowne sprawdzenie stabilności procesu (z uwzględnieniem strumieni produkcji)</u></p> <p>Jeśli proces w dalszym ciągu proces wykazywałby stabilność, możliwe byłoby przejście do kolejnego etapu:</p> <p>e) <u>Wstępna analiza wybranych potencjalnych przyczyn</u></p> <ul style="list-style-type: none"> - wykorzystanie odpowiednich narzędzi (w zależności od rodzaju posiadanych danych) do przeprowadzenia analizy zidentyfikowanych potencjalnych przyczyn problemu: ✓ zamocowania przedmiotu ✓ ułożyskowania wrzeciona obrabiarki ✓ prostoliniowości prowadnic obrabiarki - identyfikacja prawdopodobnej przyczyny (lub przyczyn) występującego błędu. <p>f) <u>Dalsza analiza prawdopodobnych przyczyn</u></p> <ul style="list-style-type: none"> - dla zidentyfikowanych na poprzednim etapie

	prawdopodobnych przyczyn, przeprowadzenie dalszej analizy, przy wykorzystaniu odpowiednich metod i narzędzi (w zależności od ilości i rodzaju posiadanych danych, a także ewentualnej możliwości ingerencji w analizowany proces), umożliwiające identyfikację najbardziej prawdopodobnej przyczyny (lub przyczyn) występującego błędu obróbki.
4. <u>Doskonalenie</u> Wprowadzono nowy uchwyt do zamocowania przedmiotu obrabianego na tokarce.	4. <u>Planowanie rozwiązania</u> - generowanie rozwiązań, przy wykorzystaniu wiedzy technologicznej i ewentualnym wsparciu technikami pobudzania kreatywności - wybór rozwiązania, z uwzględnieniem ustalonych kryteriów oraz upewnienie się, że rozwiązanie spełnia odpowiednie warunki ekonomiczne - weryfikacja rozwiązania: ✓ planowanie rozwiązania ✓ testowanie rozwiązania ✓ ocena wyników.
5. <u>Sterowanie</u> Wprowadzono zmiany w dokumentacji procesowej i planach kontroli. Po wprowadzeniu udoskonalenia, zdolność procesu ukształtowała się na poziomie $C_{pk} = 1,66$.	5. <u>Wdrożenie rozwiązania</u> - wdrożenie rozwiązania, które pozytywnie przeszło weryfikację - utrzymanie zmian: ✓ standaryzacja ✓ plany kontroli ✓ wprowadzenie zakończonego projektu doskonalącego do <i>Biblioteki przypadków</i>

Źródło: opracowanie własne

Z przeprowadzonego porównania wynika, że zastosowanie opracowanej *Metodyki redukcji zmienności procesów obróbki skrawaniem* przy przeprowadzaniu Projektu A pozwoliłoby:

- Zidentyfikować – w sposób łatwy i szybki (korzystając z *Zestawienia potencjalnych przyczyn błędów obróbki skrawaniem* - Załącznik A) – zbiór potencjalnych przyczyn analizowanego błędu obróbki, wśród których znajduje się rzeczywista przyczyna powstającego błędu.
- Skrócić i usprawnić etap Analizy, który w Projekcie A zajął długi okres czasu i obejmował długotrwałe szukanie potencjalnych przyczyn problemu oraz wiele niezależnie prowadzonych badań i testów.

Można także wnosić, że zastosowanie opracowanej *Metodyki redukcji zmienności procesów obróbki skrawaniem* zwiększyłyby skuteczność i efektywność Projektu A poprzez:

- Skupienie działań na najważniejszym obszarze problemu – dzięki zastosowaniu stratyfikacji na etapie zbierania danych i ewentualnej identyfikacji „strumieni produkcji” w badanym procesie.
- Uniknięcie ewentualnych błędów w analizach wskutek bazowania na nierzetelnych danych – dzięki zastosowaniu analizy systemu pomiarowego (MSA).
- Uniknięcie ewentualnego wprowadzenia nieodpowiedniego rozwiązania – dzięki przemyślanemu wyborowi i uprzedniej weryfikacji rozwiązania.
- Wzbogacenie wiedzy procesowej w organizacji oraz uniknięcie ewentualnej konieczności ponownego rozwiązywania tego samego problemu – dzięki

wprowadzeniu informacji dotyczących zakończonego projektu doskonalącego do *Biblioteki przypadków*.

5.2. Projekt B

Projekt B, realizowany w przedsiębiorstwie Y:

- Dotyczył procesu kształtowania rowka w wałku napędowym w operacji przeciągania.
- 85% wyrobów nie mieściło się w granicach specyfikacji ze względu na przekroczoną wartość charakterystyki krytycznej dla jakości, jaką był błąd kształtu rowka w przekroju poprzecznym.
- W procesie musiała zostać wprowadzona 100% kontrola oraz dodatkowa operacja w celu poprawiania wyrobów niezgodnych ze specyfikacją.
- Analiza zdolności procesu wykazała, że zdolność procesu związana z mierzoną charakterystyką krytyczną dla jakości (kształt rowka, wyrażony przez jego wymiary w charakterystycznych przekrojach) była na poziomie $C_{pk} = 0,06$.
- W wyniku przeprowadzonych działań, sprawdzeń i analiz, jako główną przyczynę problemu zidentyfikowano niewłaściwy kształt narzędzia obróbczego (przeciągacza).
- Po wprowadzeniu nowego narzędzia, zdolność procesu ukształtowała się na poziomie $C_{pk} = 1,3$.
- Projekt trwał ok. 2 miesiące.

W Tabeli 5.2 przedstawiono przebieg procesu doskonalenia przeprowadzonego w ramach Projektu B i zestawiono go z przebiegiem projektu zgodnym z opracowaną *Metodyką redukcji zmienności procesów obróbki skrawaniem*.

Tabela 5.2. Porównanie działania opracowanej metodyki z przebiegiem projektu B

Przebieg przeprowadzonego projektu doskonalącego	Przebieg projektu doskonalącego zgodny z opracowaną metodyką (patrz Rys.4.15)
1. Zdefiniowanie - sposób obróbki - rodzaj i wielkość błędu obróbki - okres występowania problemu	1. Wstępna charakterystyka sytuacji - sposób obróbki - rodzaj i wielkość błędu obróbki - od kiedy występuje?
2. Pomiar - zmapowano proces - przeprowadzono analizę systemu pomiarowego, w wyniku której zmieniono system pomiarowy na lepiej spełniający wymagania - zebrano dane dotyczące krytycznej charakterystyki wyjściowej (Y) – kształtu rowka – bez uwzględnienia stratyfikacji - obliczono zdolność procesu ($C_{pk} = 0,06$) - ustalono cel projektu (min. $C_{pk} = 1,0$)	2. Szczegółowa analiza stanu procesu - mapa procesu - zebranie danych dotyczących Y: ✓ ew. dane historyczne – weryfikacja aktualności, liczebności oraz wiarygodności (MSA) ✓ plan zbierania aktualnych danych (z uwzględnieniem ewentualnych zidentyfikowanych strumieni produkcji) ✓ analiza systemu pomiarowego (MSA) ✓ zebranie aktualnych danych (stratyfikacja) - sprawdzenie „normalności” rozkładu danych - sprawdzenie stabilności procesu (z uwzgl. strumieni produkcji) -> ew. stabilizacja procesu - analiza zdolności procesu (z ewentualnym uwzględnieniem strumieni produkcji) - ustalenie celu doskonalenia.

<p>3. <u>Analiza</u></p> <ul style="list-style-type: none"> - przeprowadzono burzę mózgów - kilka ze zidentyfikowanych potencjalnych przyczyn problemu wytypowano do przetestowania - zebrano dodatkowe dane dotyczące każdej z wytypowanych potencjalnych przyczyn problemu, przeprowadzając sprawdzenia wpływu: <ul style="list-style-type: none"> ✓ twardości materiału (pręt normalizowany i nie normalizowany;) ✓ narzędzia obróbczego (przeciąganie i frezowanie) - zaplanowano i przeprowadzono eksperyment (DoE), sprawdzający wpływ 3 czynników związanych z warunkami obróbki cieplnej (przeprowadzanej po operacji przeciągania) na wymiary i kształt rowka - ustalono, że ani twardość materiału ani warunki obróbki cieplnej nie mają znaczącego wpływu na zmianę kształtu rowka. <p>W wyniku przeprowadzonych testów i analiz, jako główną przyczynę problemu zidentyfikowano niewłaściwy kształt narzędzia obróbczego (przeciągacza).</p>	<p>3. <u>Analiza zmienności naturalnej procesu</u></p> <p>a) <u>Identyfikacja potencjalnych przyczyn</u></p> <ul style="list-style-type: none"> - skorzystanie z <i>Zestawienia potencjalnych przyczyn błędów obróbki skrawaniem</i> (Załącznik A): <p>Dla obróbki metodą przeciągania, błąd kształtu powierzchni obrabianej w przekroju poprzecznym, zgodnie z zestawieniem, może być spowodowany:</p> <ul style="list-style-type: none"> o niedokładnością kształtu narzędzia lub o odkształceniami sprężystymi podczas obróbki. <ul style="list-style-type: none"> - wybór najbardziej prawdopodobnych przyczyn przy użyciu wiedzy procesowej <p>b) <u>Określenie sposobów sprawdzenia wpływu potencjalnych przyczyn na powstający błąd obróbki</u></p> <p>c) <u>Zebranie dodatkowych danych</u></p> <p>Jeśli zebrane dotychczas dane okazałyby się niewystarczające do celu sprawdzenia wpływu zidentyfikowanych potencjalnych przyczyn na powstający błąd obróbki, należałoby zebrać dodatkowe dane, a także przeprowadzić:</p> <p>d) <u>Ponowne sprawdzenie stabilności procesu (z uwzględnieniem strumieni produkcji)</u></p> <p>Jeśli proces w dalszym ciągu proces wykazywałby stabilność, możliwe byłoby przejście do kolejnego etapu:</p> <p>e) <u>Wstępna analiza wybranych potencjalnych przyczyn</u></p> <ul style="list-style-type: none"> - wykorzystanie odpowiednich narzędzi (w zależności od rodzaju posiadanych danych) do przeprowadzenia analizy zidentyfikowanych potencjalnych przyczyn problemu: <ul style="list-style-type: none"> ✓ kształtu narzędzia ✓ odkształceń sprężystych podczas obróbki - identyfikacja prawdopodobnej przyczyny (lub przyczyn) występującego błędu. <p>f) <u>Dalsza analiza prawdopodobnych przyczyn</u></p> <ul style="list-style-type: none"> - dla zidentyfikowanych na poprzednim etapie prawdopodobnych przyczyn, przeprowadzenie dalszej analizy, przy wykorzystaniu odpowiednich metod i narzędzi (w zależności od ilości i rodzaju posiadanych danych, a także ewentualnej możliwości ingerencji w analizowany proces), umożliwiającej identyfikację najbardziej prawdopodobnej przyczyny (lub przyczyn) występującego błędu obróbki.
<p>4. <u>Doskonalenie</u></p> <p>Zaproponowano wprowadzenie nowego narzędzia obróbczego.</p> <p>Przetestowano wpływ zmiany kształtu narzędzia obróbczego na kształt rowka.</p>	<p>4. <u>Planowanie rozwiązania</u></p> <ul style="list-style-type: none"> - generowanie rozwiązań, przy wykorzystaniu wiedzy technologicznej i ewentualnym wsparciu technikami pobudzania kreatywności - wybór rozwiązania, z uwzględnieniem

	ustalonych kryteriów oraz upewnienie się, że rozwiązanie spełnia odpowiednie warunki ekonomiczne - weryfikacja rozwiązania: ✓ planowanie rozwiązania ✓ testowanie rozwiązania ✓ ocena wyników.
5. Sterowanie Wprowadzono zmiany w dokumentacji procesowej i planach kontroli. Po wprowadzonym udoskonaleniu, zdolność procesu ukształtowała się na poziomie $C_{pk} = 1,3$.	5. Wdrożenie rozwiązania - wdrożenie rozwiązania, które pozytywnie przeszło weryfikację - utrzymanie zmian: ✓ standaryzacja ✓ plany kontroli ✓ wprowadzenie zakończonego projektu doskonalącego do <i>Biblioteki przypadków</i>

Źródło: opracowanie własne

Przeprowadzone porównanie pozwala stwierdzić, że zastosowanie opracowanej *Metodyki redukcji zmienności procesów obróbki skrawaniem* przy przeprowadzaniu Projektu B zapewniłoby:

- Łatwą i szybką identyfikację (z wykorzystaniem *Zestawienia potencjalnych przyczyn błędów obróbki skrawaniem* – Załącznik A) – zbioru potencjalnych przyczyn analizowanego błędu obróbki, wśród których znajduje się rzeczywista przyczyna powstającego błędu.

Ponadto, można przypuszczać, że zastosowanie opracowanej *Metodyki redukcji zmienności procesów obróbki skrawaniem* zwiększyłoby skuteczność i efektywność Projektu B poprzez:

- Usprawnienie przeprowadzenia etapu Analizy – dzięki wskazaniu zorganizowanego sposobu przeprowadzania badań i analiz, pozwalającego uniknąć przeprowadzania wielu niezależnych badań i testów.
- Skupienie działań na najważniejszym obszarze problemu – dzięki zastosowaniu stratyfikacji na etapie zbierania danych i ewentualnej identyfikacji „strumieni produkcji” w badanym procesie.
- Wzbogacenie wiedzy procesowej w organizacji oraz uniknięcie ewentualnej konieczności ponownego rozwiązywania tego samego problemu – dzięki wprowadzeniu informacji dotyczących zakończonego projektu doskonalącego do *Biblioteki przypadków*.

5.3. Porównanie opracowanej Metodyki redukcji zmienności procesów obróbki skrawaniem z przebiegiem projektów doskonalących przeprowadzonych zgodnie z innym algorytmem doskonalenia – podsumowanie

Wstępnej weryfikacji potencjalnej skuteczności opracowanej *Metodyki redukcji zmienności procesów obróbki skrawaniem* dokonano poprzez porównanie przebiegu dwóch projektów doskonalących przeprowadzonych w przedsiębiorstwach (z zastosowaniem algorytmu doskonalenia DMAIC) z przebiegiem procesu doskonalenia zgodnym z zaproponowaną metodyką.

Przeprowadzone porównanie pozwala stwierdzić, że opracowana *Metodyka redukcji zmienności procesów obróbki skrawaniem*:

- Pozwoli w łatwy i szybki sposób zidentyfikować zbiór potencjalnych przyczyn powstawania danego błędu obróbki, dzięki wykorzystaniu zgromadzonej w opracowanym *Zestawieniu potencjalnych przyczyn błędów obróbki skrawaniem* wiedzy technologicznej (w formie tabelarycznej – Załącznik A, lub w formie zaproponowanego systemu ekspertowego – Załącznik B). W ten sposób, od początku etapu analizy, działania zostaną skupione na ograniczonej grupie prawdopodobnych przyczyn badanego problemu, dzięki czemu znacząco usprawniony może zostać przebieg projektu doskonalącego.
- Może usprawnić i ułatwić przebieg działań w ramach projektu doskonalącego, wskazując jednoznaczny algorytm postępowania.
- Może pomóc w odpowiednim ukierunkowaniu prowadzonych działań i analiz, dzięki identyfikacji ewentualnych „strumieni produkcji” w badanym procesie.
- Przyczyni się do zapewnienia stałości wprowadzanych rozwiązań, a także do wzbogacania wiedzy procesowej przedsiębiorstwa, poprzez gromadzenie informacji o skutecznie rozwiązanych problemach w *Bibliotece przypadków*.

Na podstawie przeprowadzonego porównania uznano, że opracowana *Metodyka redukcji zmienności procesów obróbki skrawaniem* może spełnić swoje zadanie, umożliwiając doskonalenie procesów poprzez redukcję ich naturalnej zmienności. Przystąpiono zatem do weryfikacji opracowanej metodyki poprzez jej zastosowanie do doskonalenia wybranego procesu produkcyjnego. Przebieg oraz wyniki przeprowadzonej weryfikacji przedstawiono w kolejnym rozdziale niniejszej pracy.

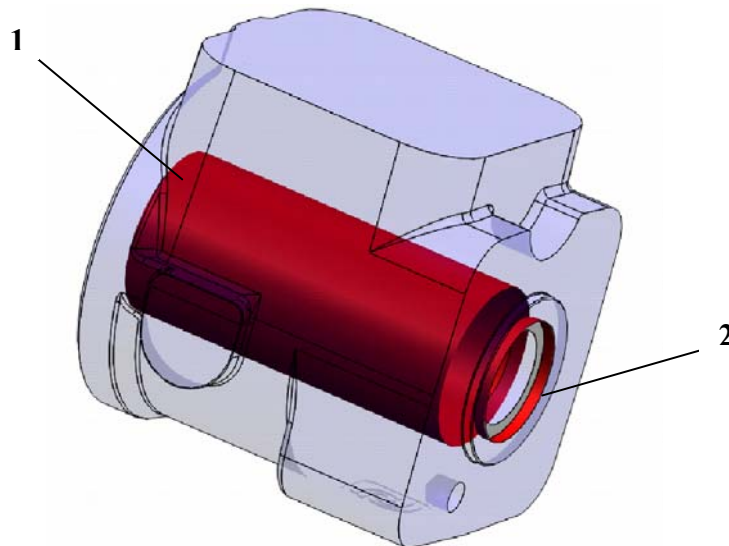
6. WERYFIKACJA OPRACOWANEJ METODYKI REDUKCJI ZMIENNOŚCI PROCESÓW OBRÓBKII SKRAWANIEM

Weryfikację opracowanej *Metodyki redukcji zmienności procesów obróbki skrawaniem* przeprowadzono poprzez zastosowanie jej do doskonalenia rzeczywistego procesu produkcyjnego, w przedsiębiorstwie Sauer-Danfoss sp. z o. o. we Wrocławiu.

6.1. Wstępna charakterystyka sytuacji

Problem wytypowany do rozwiązania dotyczył zbyt dużej zmienności wartości błędu współosiowości otworów kształtowanych w procesie wiercenia korpusów (produkcja wielkoseryjna).

Na Rysunku 6.1 przedstawiono schemat wyrobu, którego dotyczył problem. Analizowano błąd współosiowości otworów 1 i 2, zaznaczonych na rysunku kolorem czerwonym.



Rys.6.1. Schemat korpusu, którego dotyczył analizowany problem.

Źródło: opracowanie na podstawie materiałów firmy Sauer-Danfoss sp. z o. o.

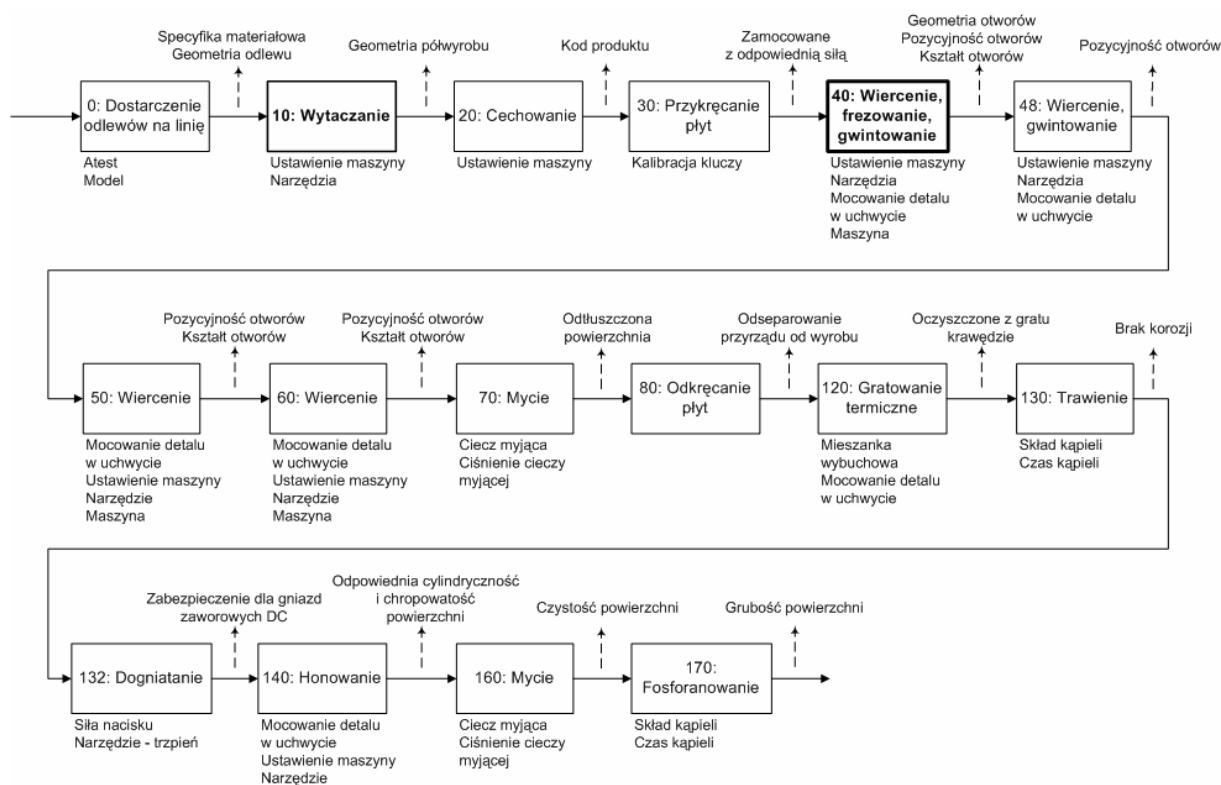
Na podstawie prowadzonych pomiarów, stwierdzono, że wartości błędu współosiowości otworów 1 i 2 cechuje zbyt duża zmienność. Przy wartości tolerancji określonej na $T = 0,1$ [mm], wyniki pomiarów osiągały zarówno wartości rzędu $0,001$ [mm], jak i przekraczały dopuszczalną granicę tolerancji. Tak duża zmienność wartości tego błędu położenia prawdopodobnie występowała w analizowanym procesie od początku jego istnienia.

Współosiowość otworów 1 i 2 jest cechą, która wpływa na trwałość oraz funkcjonalność wyrobu końcowego. Dlatego redukcja zmienności jej wartości jest istotna dla zapewnienia odpowiedniego poziomu jakości wyrobu.

6.2. Szczegółowa analiza stanu procesu

6.2.1. Mapa procesu

W celu dokładnego przeanalizowania istniejącej sytuacji, zgodnie z opracowaną metodyką, sporządzono mapę analizowanego procesu obróbki korpusów (Rysunek 6.2).



Rys.6.2. Mapa analizowanego procesu

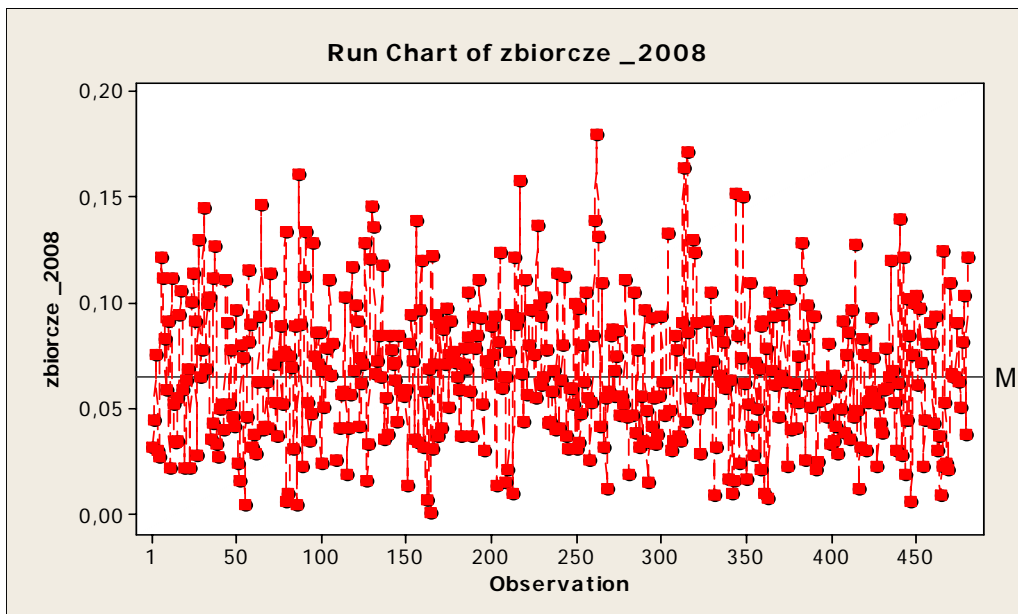
Źródło: opracowanie własne

Sporządzenie mapy procesu ułatwiło zidentyfikowanie operacji, które mogą wpływać na kształtowanie badanej cechy wyrobu, jaką jest współosiowość otworów 1 i 2. Ustalono, że cecha ta kształtowana jest podczas wiercenia przeprowadzanego w operacji 40 (obejmującej wiercenie, frezowanie i gwintowanie), jednak na jej wartość może także wpływać wytaczanie przeprowadzane w operacji 10.

6.2.2. Analiza danych historycznych

W celu dokładniejszego określenia zastanej sytuacji, zapoznano się z dostępnymi danymi historycznymi. Aby zwizualizować dane, przedstawiono je w formie karty przebiegu procesu (Rysunek 6.3; na tej i kolejnych przedstawianych w niniejszym rozdziale kartach przebiegu procesu linią odniesienia jest mediana)^{‡‡}.

^{‡‡} Wykresy i obliczenia statystyczne zawarte w niniejszym rozdziale wykonano przy użyciu programu Minitab, wersja 14.



Rys.6.3. Karta przebiegu procesu dla wyników pomiarów odchyłki współosiowości otworów 1 i 2, prowadzonych od sierpnia do grudnia 2008

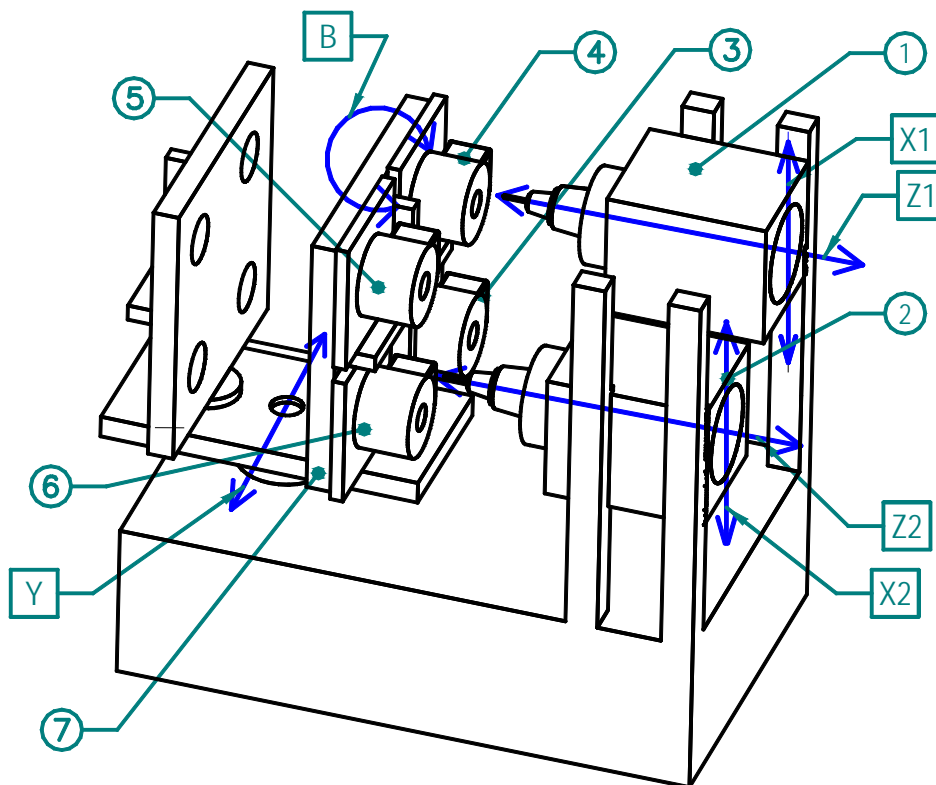
Źródło: opracowanie własne

Posiadane dane zebrane zostały w okresie ostatnich pięciu miesięcy przed rozpoczęciem niniejszej analizy (sierpień – grudzień 2008r.) i pozwalały stwierdzić, że wartości błędu współosiowości otworów 1 i 2 korpusów wytwarzanych w analizowanym procesie cechowała w tym okresie duża zmienność – zakres wartości, jakie osiągał w tym czasie analizowany błąd współosiowości rozciągał się od 0,001 [mm] do 0,18 [mm]. Zatem proces nie spełniał stawianych przed nim wymagań, bowiem zakres zmienności badanej cechy przekraczał granice tolerancji (0,1 [mm]).

6.2.3. Plan zbierania danych, z uwzględnieniem strumieni produkcji

Na podstawie tak określonej sytuacji, przystąpiono do planowania procesu zbierania aktualnych danych, które pozwoliłyby szczegółowo opisać aktualny stan badanego procesu.

W celu uwzględnienia wszystkich potencjalnie istotnych czynników, rozważono istnienie ewentualnych strumieni produkcji w ramach analizowanego procesu. W efekcie, stwierdzono że na ostateczny wynik procesu rzeczywiście składają się możliwe do wyodrębnienia strumienie, wynikające ze specyfiki analizowanego procesu. Przede wszystkim, operację 40 wykonują trzy jednakowe obrabiarki, produkujące ten sam typ wyrobu. Ponadto, na każdej z pracujących w operacji 40 obrabiarek dwa wrzeciona wykonują równoległe wiercenie otworu 1 w czterech korpusach zamocowanych jednocześnie na stole obrotowym obrabiarki (Rysunek 6.4).



Rys.6.4. Schemat obrabiarki pracującej w operacji 40

Legenda:

1, 2 – wrzeciona obrabiarki:

1 - wrzeciono prawe (P),

2 - wrzeciono lewe (L)

3-6 – przedmioty obrabiane, zamocowane na płytach mocujących, w gniazdach mocujących na stole obrabiarki:

3- gniazdo prawe dolne (PD),

4 - gniazdo prawe górne (PG),

5 - gniazdo lewe górne (LG),

6 - gniazdo lewe dolne (LD)

7 – stół obrotowy obrabiarki

B – kierunek obrotu stołu obrotowego obrabiarki

X1, X2, Y, Z1, Z2 – kierunki ruchu w osiach: x, y, z

Źródło: opracowanie własne

Na tej podstawie, zidentyfikowano w analizowanym procesie tzw. strumienie produkcji, związane z wykonywaniem operacji:

- na trzech obrabiarkach,
- a na każdej z nich:
- za pomocą dwóch pracujących równolegle wrzecion,
- przy zamocowaniu przedmiotów obrabianych w czterech gniazdach mocujących na stole obrabiarki.

W związku z tym, aby umożliwić skoncentrowanie dalszych działań na możliwie jednoznacznie zdefiniowanym problemie, w celu zapewnienia skuteczności prowadzonych działań, do dalszej analizy wybrano jedną z trzech obrabiarek, wykonujących badaną operację. Ponadto, w sporządzonym planie zbierania danych uwzględniono wpływ zidentyfikowanych strumieni produkcji, których istnienie do tej pory nie było uwzględniane podczas analizy badanego procesu, a dane pochodzące z różnych strumieni nie były rozdzielane.

W opracowywanym planie badań przewidziano stratyfikację ze względu na cztery zidentyfikowane strumienie związane z czterema gniazdami mocującymi, w których zamocowane są wyroby podczas obróbki. Jednocześnie, identyfikacja gniazd mocujących umożliwiła jednoznaczny identyfikację wrzeciona, które pracowało przy obróbce danego korpusu (gniazdo LG i LD – wrzeciono lewe, gniazda PG i PD – wrzeciono prawe).

Do innych czynników, potencjalnie istotnych w odniesieniu do powstającego w analizowanym procesie błędu obróbki zaliczono na tym etapie płyty mocujące stosowane do mocowania przedmiotów obrabianych w operacji 40, a także ewentualny wpływ poprzedniej operacji (10), w której wstępnie kształtowany jest otwór 1. Czynniki te w przedsiębiorstwie uważany był za jedną z prawdopodobnych przyczyn wpływających na ostateczną wartość powstającego błędu obróbki.

Aby wziąć pod uwagę wszystkie wstępnie zidentyfikowane na tym etapie czynniki, mogące mieć wpływ na powstający błąd obróbki, w planie zbierania danych uwzględniono następujące informacje, dla każdego mierzzonego korpusu:

- wartość odchyłki współosiowości otworów 1 i 2 korpusu po operacji 10,
- wartość odchyłki współosiowości otworów 1 i 2 korpusu po operacji 40,
- numer płyty mocującej stosowanej do mocowania przedmiotu podczas obróbki w operacji 40,
- oznaczenie gniazda mocującego, w którym zamocowany był korpus na stole obrabiarki (pozwalające jednocześnie zidentyfikować wrzeciono: P lub L) podczas obróbki w operacji 40.

Zaplanowano przeprowadzenie minimum 60 pomiarów.

6.2.4. Analiza systemu pomiarowego

Pomiary dokonywane były na współrzędnościowej maszynie pomiarowej marki Carl Zeiss, model *GageMax*, wyposażonej w głowicę skaningową. Rozdzielczość wskazań maszyny wynosi 0,0001 [mm], jej zakres pomiarowy to: 750x500x500 [mm], a graniczny błąd dopuszczalny wskazania MPE_E wynosi:

- $2,2 + L/300$ [μm] dla temperatury 20°C,
- $2,6 + L/260$ [μm] dla temperatury 28°C,
- $2,8 + L/240$ [μm] dla temperatury 32°C,
- $3,2 + L/200$ [μm] dla temperatury 40°C,

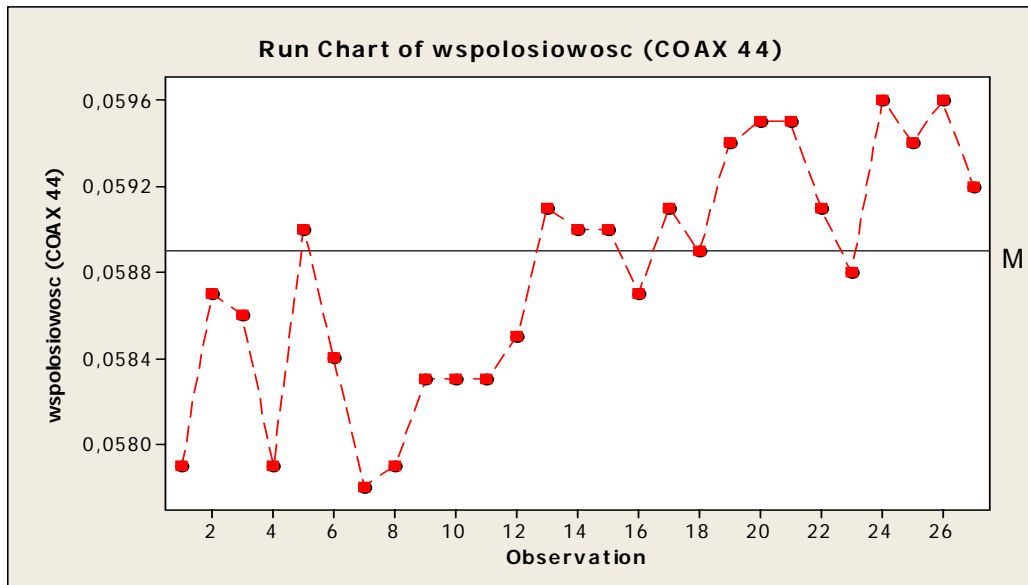
gdzie L – mierzona długość w [mm].

Graniczny błąd dopuszczalny zespołu głowicy pomiarowej dla pomiarów punktowych $MPE_P = 1,8$ [μm], a dla pomiarów skaningowych $MPE_{THP} = 3,3$ [μm]. Dopuszczalna niepewność pomiaru odchyłki okrągłości $MPE_{RONt} = 1,8$ [μm].

Maszyna ta jest pod nadzorem metrologicznym. Pomimo to, zdecydowano o przeprowadzeniu dodatkowego badania zdolności pomiarowej maszyny w odniesieniu do mierzonej cechy.

Badanie przeprowadzono za pomocą procedury pozwalającej wyznaczyć wskaźniki zdolności C_g i C_{gk} , w oparciu o pomiary wzorca (Dietrich i Schulze, 2000, s.312-323). W przypadku mierzonej cechy, jaką jest współosiowość, mamy do czynienia z tolerancją jednostronną, dlatego w analizie systemu pomiarowego obliczony został jedynie wskaźnik zdolności C_{gk} .

Do badania, zgodnie z zaleceniami, wybrano wzorec pomiarowy o wartości błędu współosiowości leżącej blisko środka pola tolerancji (pomimo, że tolerancja jest tu jednostronna, współosiowość jest cechą naturalnie ograniczoną przez 0, zatem pole tolerancji na potrzeby tego badania określono jako przedział: 0-0,1 [mm]). Dokonano 27 pomiarów wzorca (Rysunek 6.5).



Rys.6.5. Karta przebiegu procesu zawierająca wyniki pomiarów przeprowadzonych w ramach badania systemu pomiarowego w odniesieniu do błędu współosiowości otworów 1 i 2

Źródło: opracowanie własne

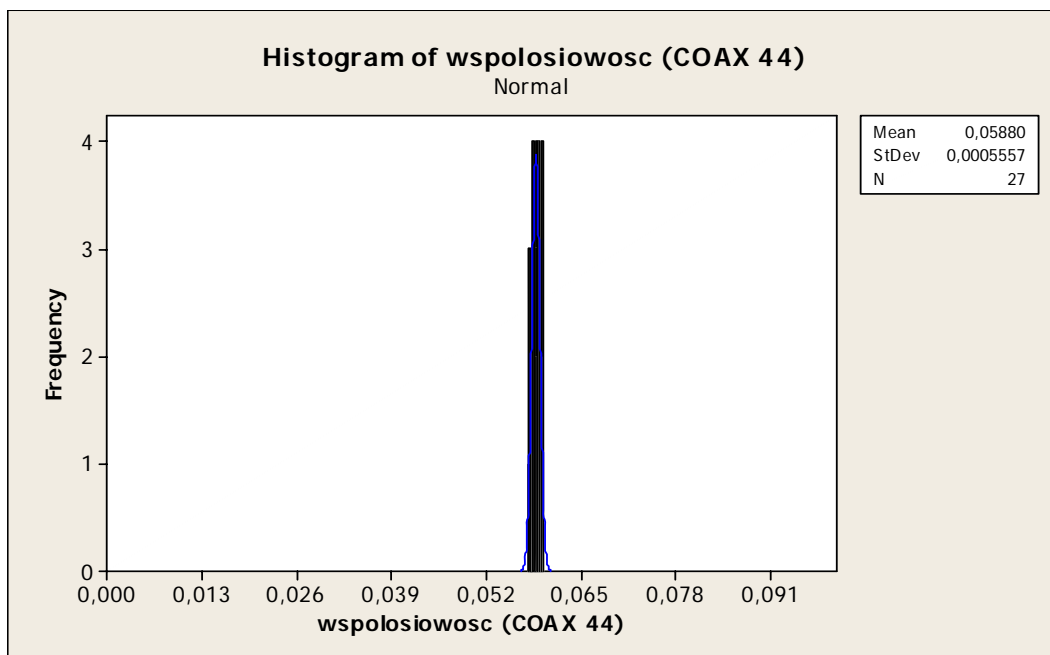
Pomimo widocznego na wykresie trendu, będącego prawdopodobnie efektem „rozgrzewania się” maszyny (przeprowadzone badanie było pierwszym użyciem maszyny pomiarowej tego dnia), wskaźnik zdolności C_{gk} (patrz Tabela 6.1) osiągnął wartość 5,94. Wartość ta znacznie przekracza przyjmowaną za graniczną wartość 1,33 (czasem: 1,00) i pozwala założyć, że stosowany system pomiarowy jest odpowiedni dla pomiaru badanej cechy i może być stosowany w dalszych badaniach.

Tabela 6.1. Obliczenie wskaźnika zdolności systemu pomiarowego w odniesieniu do błędu współosiowości otworów 1 i 2, na podstawie 27 pomiarów wzorca

średnia wyników: \bar{x}_g	0,058796296
odchylenie standardowe wyników: s_g	0,000555726
rzeczywista wartość wzorca: x_m	0,0587
wartość wskaźnika zdolności systemu pomiarowego:	$C_{gk} = \frac{(x_m + 0,1 \cdot T) - \bar{x}_g}{3 \cdot s_g} = \frac{(0,0587 + 0,1 \cdot 0,1) - 0,058796296}{3 \cdot 0,000555726} = 5,94$

Źródło: opracowanie własne

Na Rysunku 6.6 przedstawiono wyniki pomiarów przeprowadzonych w ramach badania systemu pomiarowego w odniesieniu do pola tolerancji dla analizowanej cechy – błędu współosiowości otworów 1 i 2. Wykres ten potwierdza wysoką zdolność stosowanego systemu pomiarowego.



Rys.6.6. Wyniki pomiarów przeprowadzonych w ramach badania systemu pomiarowego w odniesieniu do pola tolerancji dla błędu współosiowości otworów 1 i 2

Źródło: opracowanie własne

6.2.5. Zbieranie danych

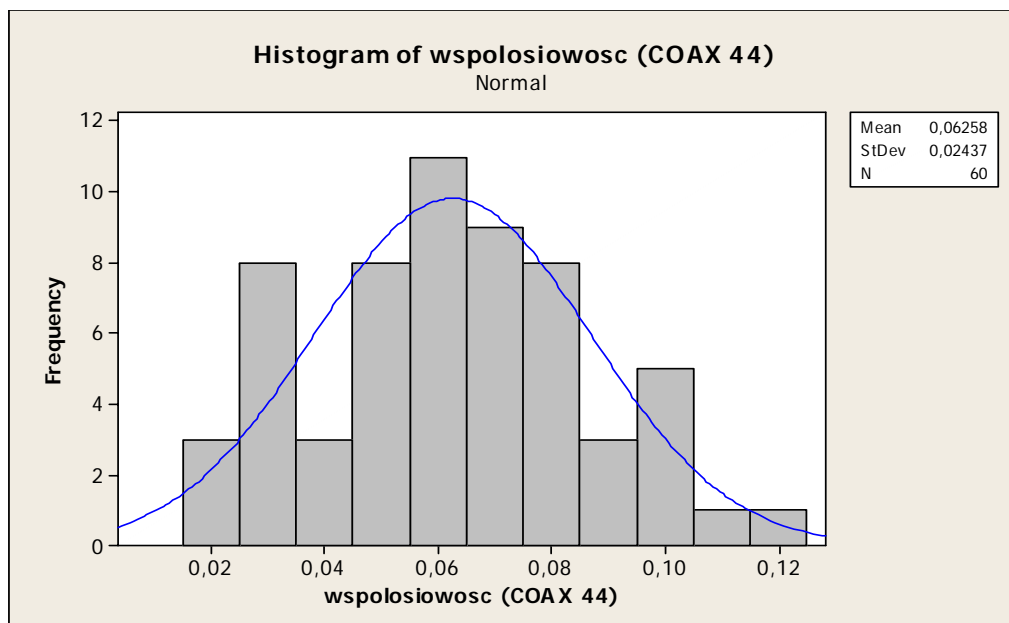
W oparciu o określony wcześniej plan, przeprowadzono zbieranie danych, przy użyciu maszyny pomiarowej o zaakceptowanej zdolności pomiarowej. Pomiar przeprowadzono w styczniu 2009 roku. Zebrano 60 danych.

6.2.6. Sprawdzenie „normalności” rozkładu danych

Aby umożliwić odpowiedni dobór dalszych metod i narzędzi analizy danych, zbadano czy populacja, z której pochodzą analizowane dane, może być modelowana za pomocą rozkładu normalnego.

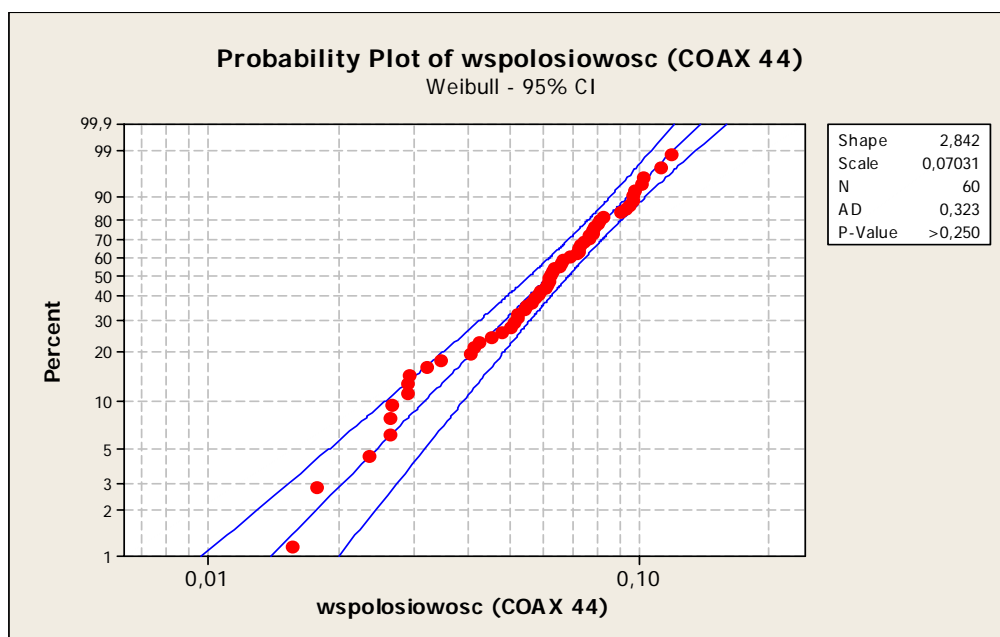
Kierując się odpowiednią wiedzą teoretyczną, z uwagi na fakt, że analizowana cecha jest cechą ograniczoną jednostronnie, a także naturalnie ograniczoną przez 0, spodziewano się, że nie będzie ona mogła być modelowana za pomocą rozkładu normalnego. Zgodnie z zaleceniami^{§§}, przyjęto, że błąd współosiowości będzie mógł być modelowany za pomocą rozkładu Weibulla. Pomimo, że w tym przypadku rozkład zebranych danych wydaje się być bardzo bliski rozkładowi normalnemu, wykazuje on jednak pewną asymetrię (miara asymetrii: $Skewness > 0$), wskazującą na przesunięcie średniej rozkładu danych w lewą stronę (Rysunek 6.7), co może potwierdzać założenie o zgodności rozkładu danych z rozkładem Weibulla. Słuszność poczynionego założenia sprawdzono wykorzystując siatkę prawdopodobieństwa rozkładu Weibulla (Rysunek 6.8).

^{§§} Według Dietricha i Schulze (2000, s.91) współosiowość to cecha, która może być modelowana rozkładem Rayleigha, który z kolei jest specjalnym przypadkiem rozkładu Weibulla – przy parametrze kształtu $\beta = 2$ (Dietrich i Schulze, 2000, s.100).



Rys.6.7. Podsumowanie wyników pomiarów odchyłki współosiowości otworów 1 i 2 zebranych podczas badania (styczeń 2009)

Źródło: opracowanie własne



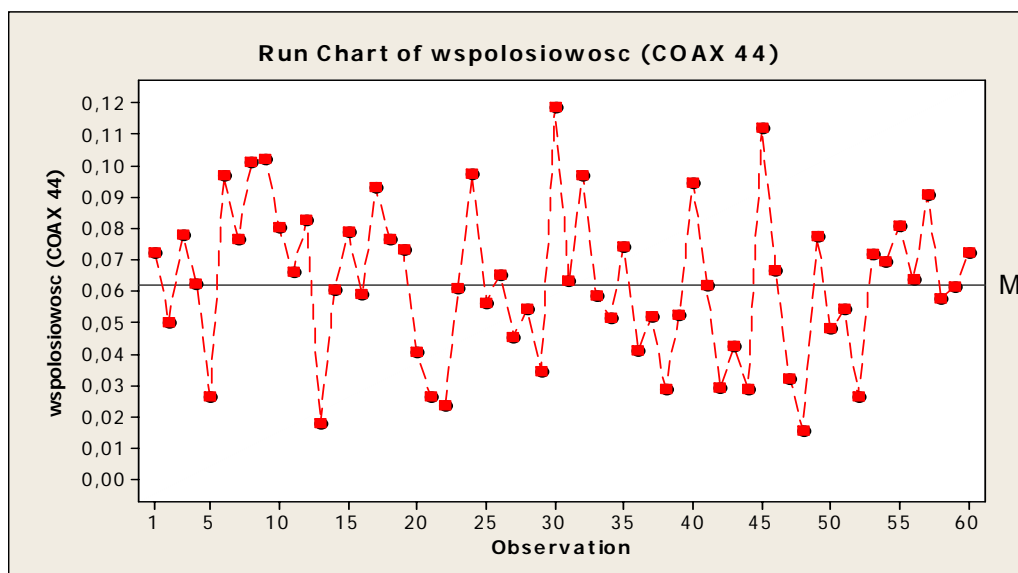
Rys.6.8. Wyniki pomiarów odchyłki współosiowości otworów 1 i 2, naniesione na siatkę prawdopodobieństwa rozkładu Weibulla

Źródło: opracowanie własne

Na fakt, że analizowany błąd współosiowości może być modelowany rozkładem Weibulla wskazuje wartość p (ang. p -value) dla przeprowadzonego testu Andersona-Darlinga, która wynosi tutaj $>0,250$, a więc (przy przyjętym poziomie istotności $\alpha = 0,05$) nie daje podstaw do odrzucenia hipotezy zerowej, mówiącej o tym, że analizowana cecha ma rozkład Weibulla. W związku z powyższym, do analiz badanej cechy w dalszym toku metodyki zastosowano takie metody i narzędzia, które nie opierają się na założeniu o „normalności” rozkładu danych.

6.2.7. Sprawdzenie stabilności procesu, z uwzględnieniem strumieni produkcji

W celu sprawdzenia stabilności analizowanego procesu zastosowano kartę przebiegu procesu (Rysunek 6.9) – w tym przypadku, ponieważ badana cecha nie może być modelowana za pomocą rozkładu normalnego, nie jest wskazane stosowanie kart kontrolnych (patrz: Algorytm doboru odpowiedniej karty kontrolnej, przedstawiony na Rysunku 4.4).



Rys.6.9. Karta przebiegu procesu dla wyników pomiarów odchyłki współosiowości otworów 1 i 2 (styczeń 2009)

Źródło: opracowanie własne

Do oceny stabilności procesu wykorzystano trzy testy dla kart przebiegu procesu proponowane m.in. przez Pyzdkę (2001, s.305-312): polegające na porównaniu maksymalnej długości przebiegu (największa liczba kolejnych punktów po jednej stronie mediany; ang. *maximum run length*), liczby przebiegów po każdej stronie mediany (ang. *number of runs about median*), oraz maksymalnej długości przebiegu wznoszącego lub opadającego (ang. *maximum consecutive increase/decrease*), z wartościami odniesienia, zależnymi od liczby wszystkich punktów naniesionych na kartę. Porównanie wartości uzyskanych i granicznych przedstawiono w Tabeli 6.2. W niektórych z wykorzystanych tabel nie zostały ujęte informacje odnoszące się do zbioru danych liczącego 60 wartości, dlatego przytoczono tu wartości graniczne dla zbioru 50 danych.

Tabela 6.2. Zestawienie wartości uzyskanych i granicznych, w ramach trzech testów stabilności stosowanych dla kart przebiegu procesu, w odniesieniu do wyników pomiarów odchyłki współosiowości otworów 1 i 2 (styczeń 2009)

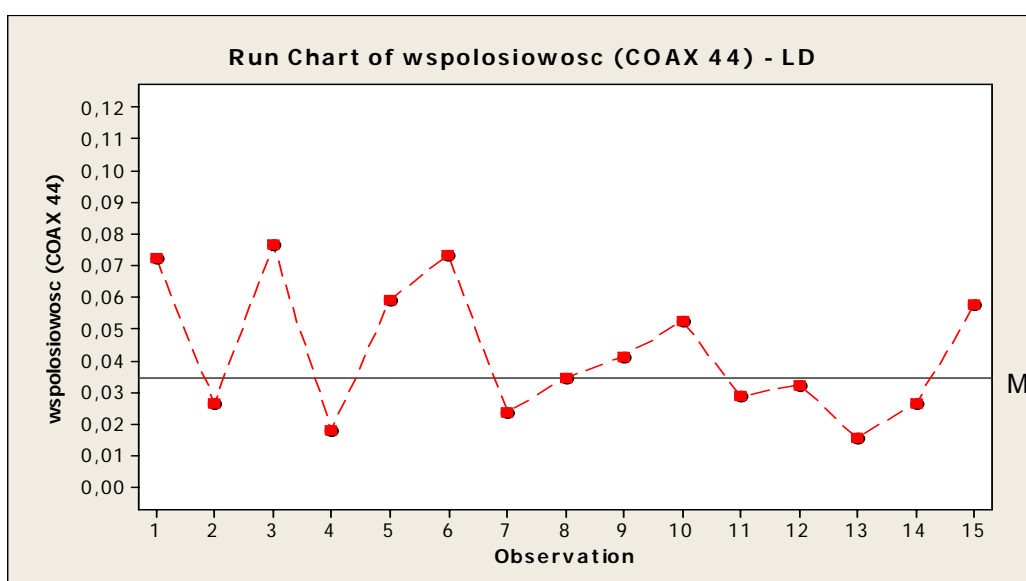
Wartości uzyskane	Wartości graniczne (według: Pyzdek, 2001, s.308-310)
maksymalna długość przebiegu	
7	10 (dla 50 danych)
liczba przebiegów	
27	od 19 do 32 (dla 50 danych)
najdłuższy przebieg wznoszący lub opadający	
5	6

Źródło: opracowanie własne

Na podstawie oceny wzrokowej karty przebiegu, oraz przeprowadzonych testów, proces uznano za stabilny – będący pod wpływem wyłącznie przyczyn losowych.

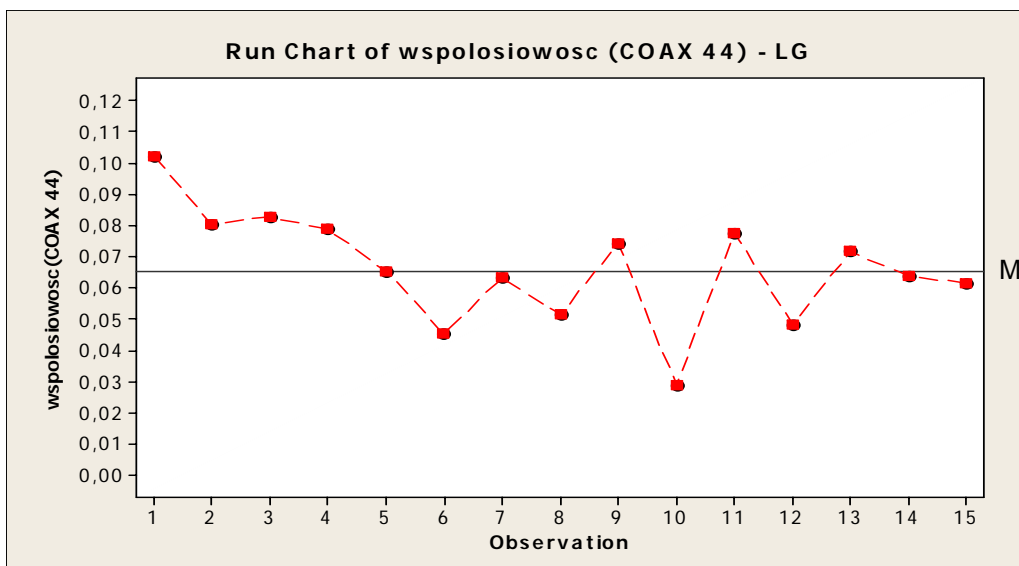
Analiza stabilności strumieni produkcji

Stratyfikacja danych umożliwiła ich podział zgodnie ze zidentyfikowanymi strumieniami produkcji – według gniazd, w których zamocowane są korpusy podczas obróbki. Dla każdego z czterech zidentyfikowanych strumieni produkcji (dla których zebrano po 15 pomiarów) – odpowiednio: gniazdo lewe dolne (LD), lewe górne (LG), prawe górne (PG), prawe dolne (PD) – sprawdzono stabilność procesu. W tym celu ponownie zastosowano – tak jak dla całego zbioru danych – karty przebiegu procesu (Rysunki 6.10 – 6.13) oraz trzy podstawowe testy dla kart przebiegu (Tabela 6.3). W jednej z wykorzystanych tabel nie zostały ujęte informacje odnoszące się do zbioru danych liczącego 15 wartości, dlatego przytoczono tu wartości graniczne dla zbiorów 14 oraz 16 danych.



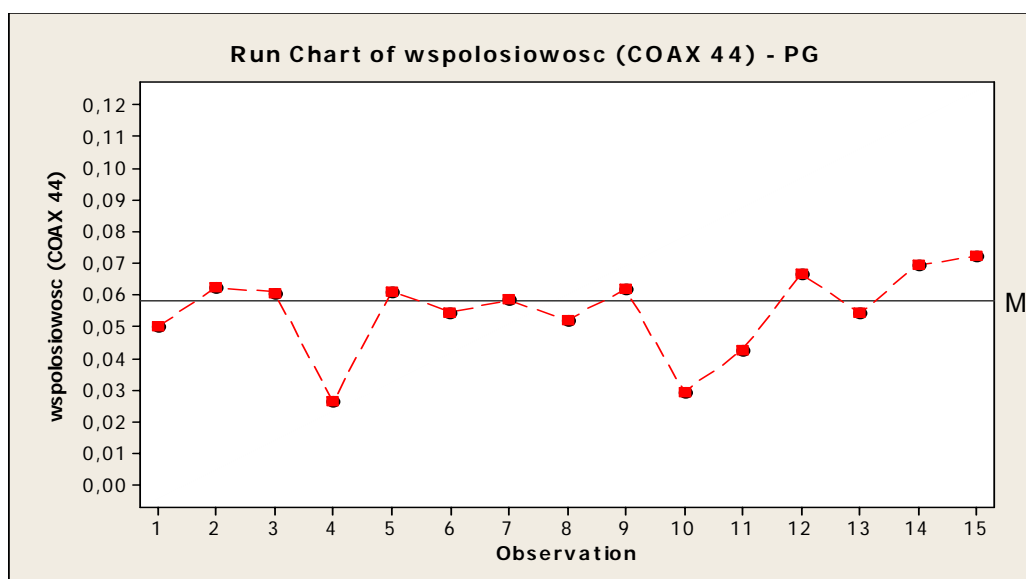
Rys.6.10. Karta przebiegu procesu dla wyników pomiarów odchyłki współosiowości otworów 1 i 2 – gniazdo lewe dolne (LD) – (styczeń 2009)

Źródło: opracowanie własne



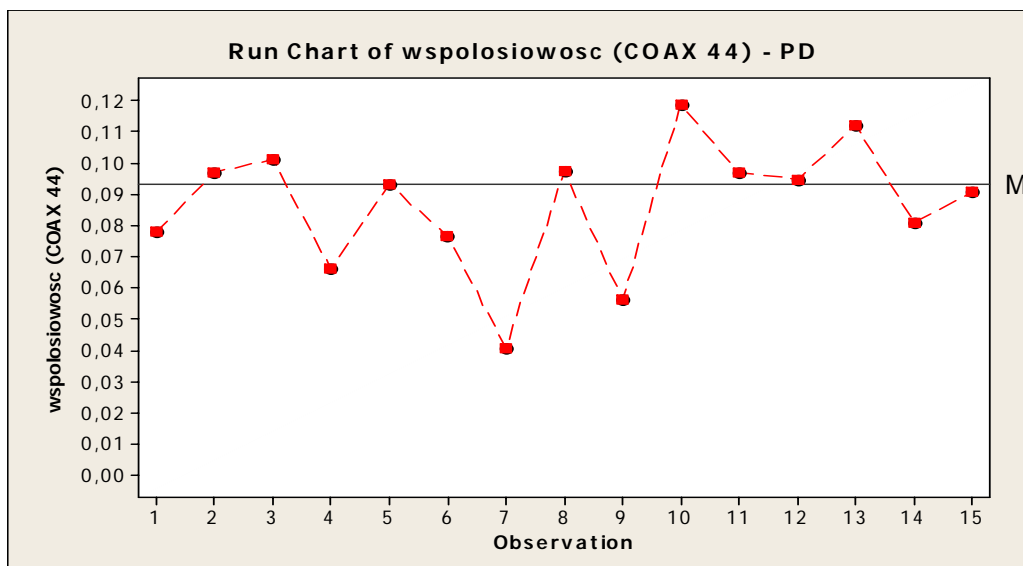
Rys.6.11. Karta przebiegu procesu dla wyników pomiarów odchyłki współosiowości otworów 1 i 2 – gniazdo lewe górne (LG) – (styczeń 2009)

Źródło: opracowanie własne



Rys.6.12. Karta przebiegu procesu dla wyników pomiarów odchyłki współosiowości otworów 1 i 2 – gniazdo prawe górne (PG) – (styczeń 2009)

Źródło: opracowanie własne



Rys.6.13. Karta przebiegu procesu dla wyników pomiarów odchyłki współosiowości otworów 1 i 2 – gniazdo prawe dolne (PD) – (styczeń 2009)

Źródło: opracowanie własne

Tabela 6.3. Zestawienie wartości uzyskanych i granicznych, w ramach trzech testów stabilności stosowanych dla kart przebiegu procesu, w odniesieniu do wyników pomiarów odchyłki współosiowości otworów 1 i 2 – dla każdego z czterech wyróżnionych strumieni produkcji (styczeń 2009)

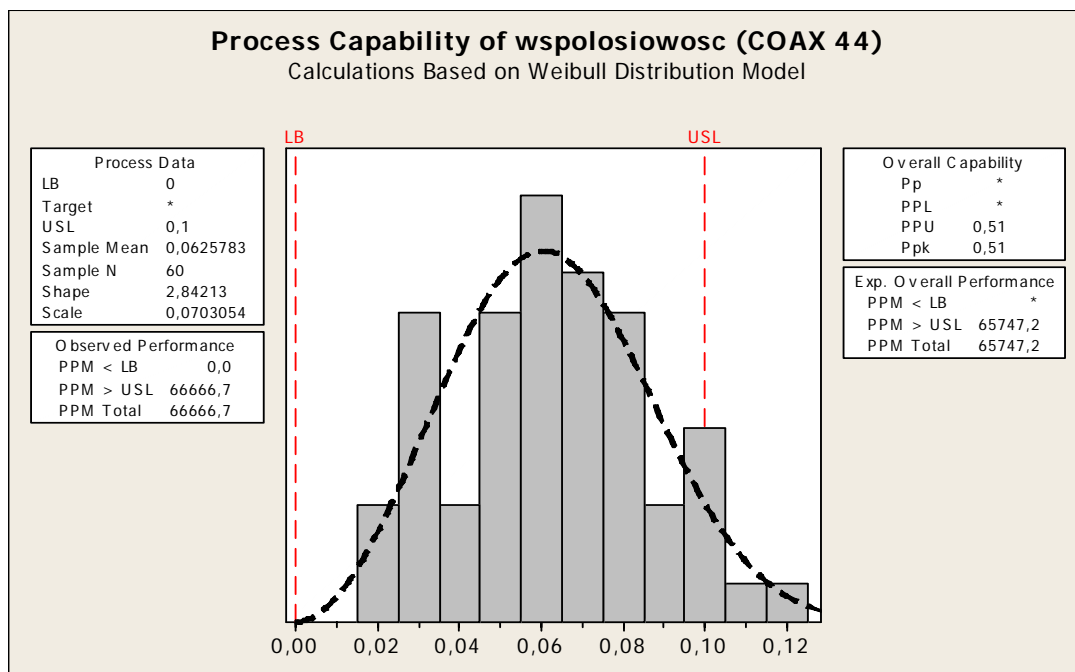
Wartości uzyskane - gniazdo lewe dolne (LD)	Wartości uzyskane - gniazdo lewe górne (LG)	Wartości uzyskane - gniazdo prawe górne (PG)	Wartości uzyskane - gniazdo prawe dolne (PD)	Wartości graniczne (według: Pyzdek, 2001, s.308-310)
maksymalna długość przebiegu				
4	4	3	4	6
liczba przebiegów				
9	8	10	7	od 4-5 do 11-12 (dla 14 danych: od 4 do 11; dla 16 danych: 5-12)
najdłuższy przebieg wznoszący lub opadający				
3	3	2	2	5

Źródło: opracowanie własne

Na podstawie oceny wzrokowej kart przebiegu, oraz przeprowadzonych testów, wszystkie cztery wyróżnione strumienie produkcji uznano za stabilne – nie będące pod wpływem przyczyn specjalnych zmienności. Ponieważ proces uznano za stabilny, możliwe było przejście do kolejnego kroku metodyki.

6.2.8. Analiza zdolności procesu, z uwzględnieniem strumieni produkcji

Zgodnie z wynikiem wcześniejszej analizy, zastosowano obliczenia wskaźników zdolności odpowiednie dla rozkładu Weibulla, uwzględniając jednocześnie fakt, że oprócz górnej granicy tolerancji wynoszącej 0,1 [mm], dane ograniczone są naturalnie przez 0 z lewej strony (Rysunek 6.14).

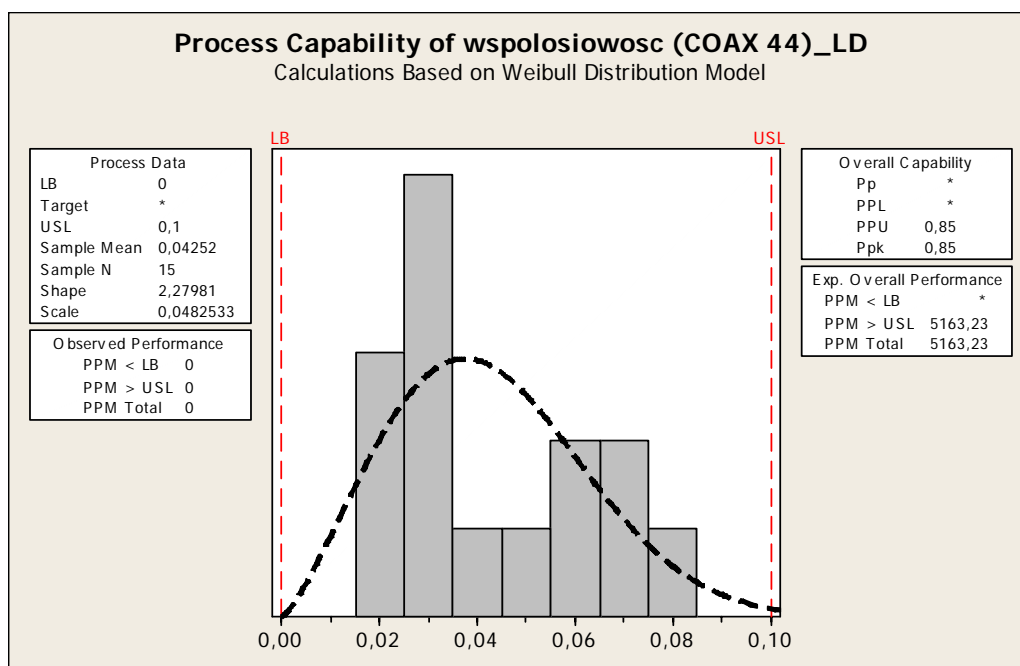


Rys.6.14. Analiza zdolności procesu w oparciu o wyniki pomiarów odchyłki współosiowości otworów 1 i 2 (styczeń 2009)

Źródło: opracowanie własne

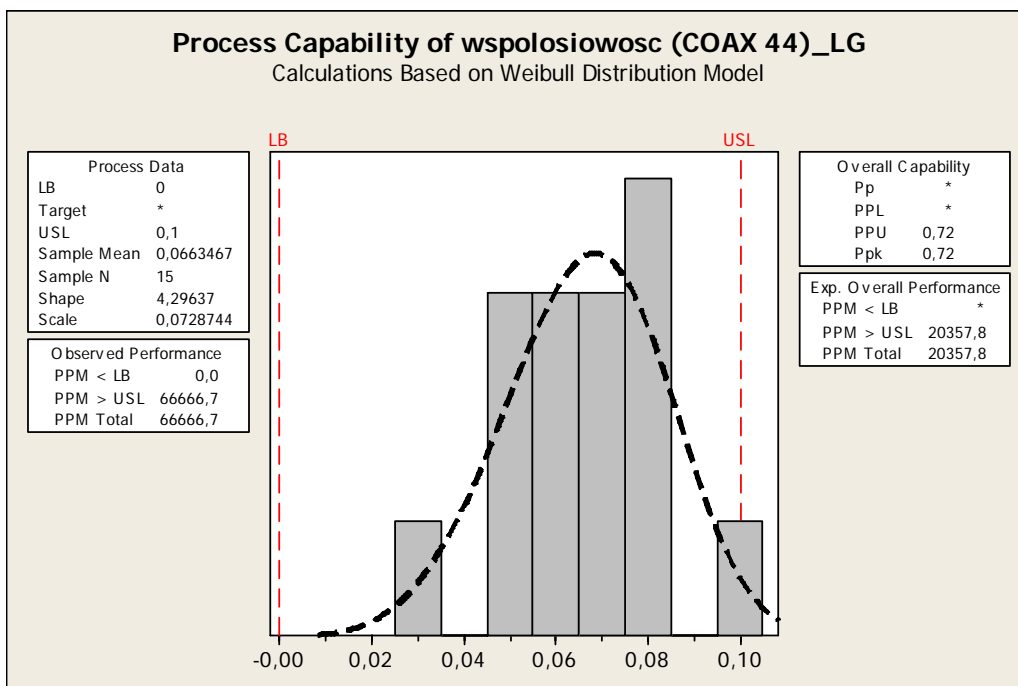
Obliczony wskaźnik zdolności procesu P_{pk} wynosi **0,51** i wskazuje, że proces nie spełnia stawianych przed nim wymagań (minimalna akceptowalna wartość powinna wynosić 1,00). Proces w odniesieniu do analizowanej cechy jest zatem niezdolny.

Korzystając z faktu, że zidentyfikowano cztery strumienie produkcji, dokonano także analizy zdolności dla każdego ze strumieni składających się na całkowity wynik procesu. Wyniki tych analiz przedstawiono na Rysunkach 6.15 – 6.18.



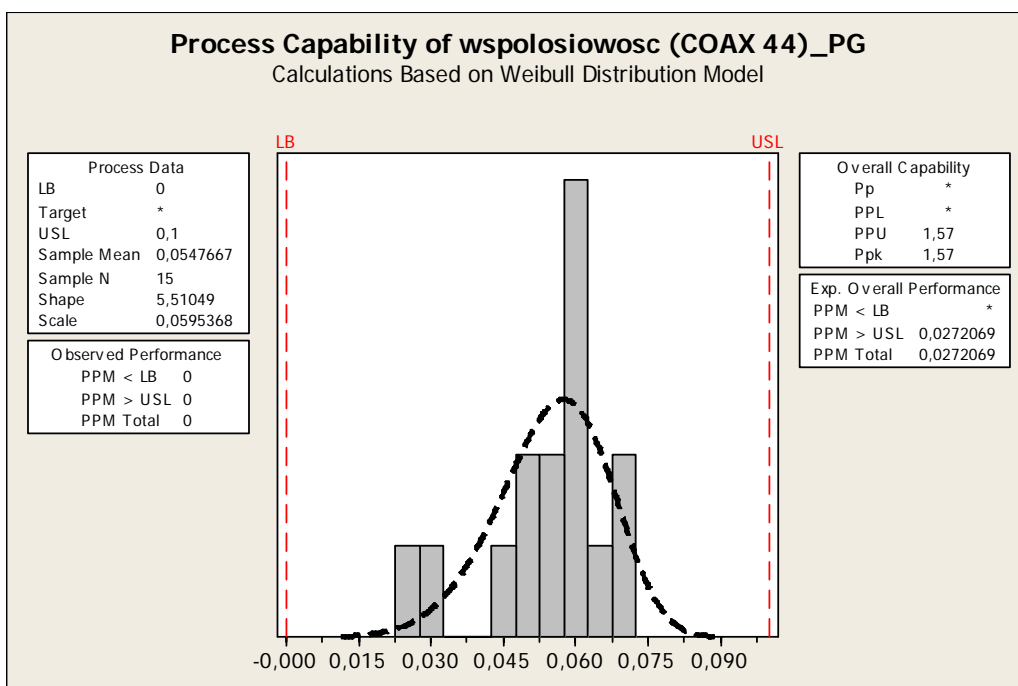
Rys.6.15. Analiza zdolności procesu w oparciu o wyniki pomiarów odchyłki współosiowości otworów 1 i 2 – gniazdo lewe dolne (LD) – (styczeń 2009)

Źródło: opracowanie własne



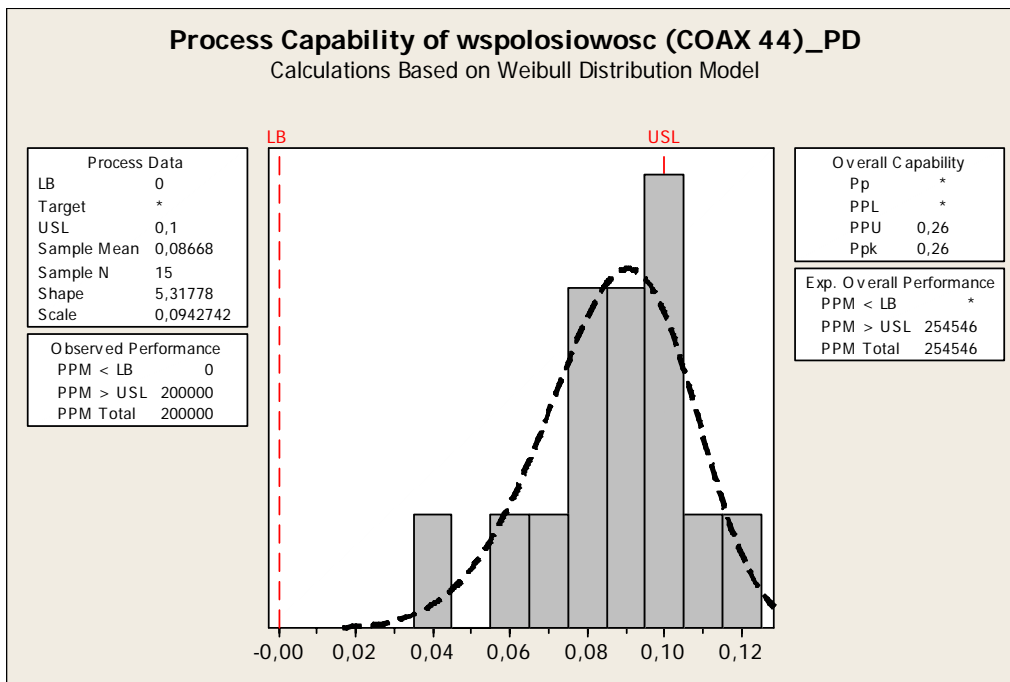
Rys.6.16. Analiza zdolności procesu w oparciu o wyniki pomiarów odchyłki współosiowości otworów 1 i 2 – gniazdo lewe górne (LG) – (styczeń 2009)

Źródło: opracowanie własne



Rys.6.17. Analiza zdolności procesu w oparciu o wyniki pomiarów odchyłki współosiowości otworów 1 i 2 – gniazdo prawe górne (PG) – (styczeń 2009)

Źródło: opracowanie własne



Rys.6.18. Analiza zdolności procesu w oparciu o wyniki pomiarów odchyłki współosiowości otworów 1 i 2 – gniazdo prawe górne (PG) – (styczeń 2009)

Źródło: opracowanie własne

Również w ramach poszczególnych zidentyfikowanych strumieni produkcji zdolność procesu w odniesieniu do analizowanej cechy, jaką jest błąd współosiowości, nie jest wystarczająca. Tylko w jednym z gniazd (PG) osiągnięty wskaźnik zdolności procesu przekroczył wartość 1,00.

6.2.9. Określenie celu doskonalenia

W oparciu o przeprowadzoną analizę stanu badanego procesu, za cel doskonalenia obrano zmniejszenie zmienności wartości błędu współosiowości otworów 1 i 2, ostatecznie kształtowanego w procesie wiercenia w operacji 40. Za cel postawiono osiągnięcie wartości zdolności procesu na poziomie przynajmniej $P_{pk} = 1,00$.

Dalszymi działaniami postanowiono objąć wszystkie cztery zidentyfikowane strumienie produkcji funkcjonujące w ramach analizowanego procesu, związane z czterema gniazdami mocującymi.

Biorąc pod uwagę wyniki analizy zdolności czterech zidentyfikowanych strumieni produkcji, zgodnie z którymi jeden ze strumieni okazał się spełniać wymagania odnośnie zdolności procesu ($P_{pk} = 1,57$), uznano, że osiągnięcie postawionego celu powinno być możliwe, bez zwiększania przy tym w sposób istotny kosztów wytwarzania.

6.3. Analiza zmienności naturalnej procesu

6.3.1. Identyfikacja potencjalnych przyczyn

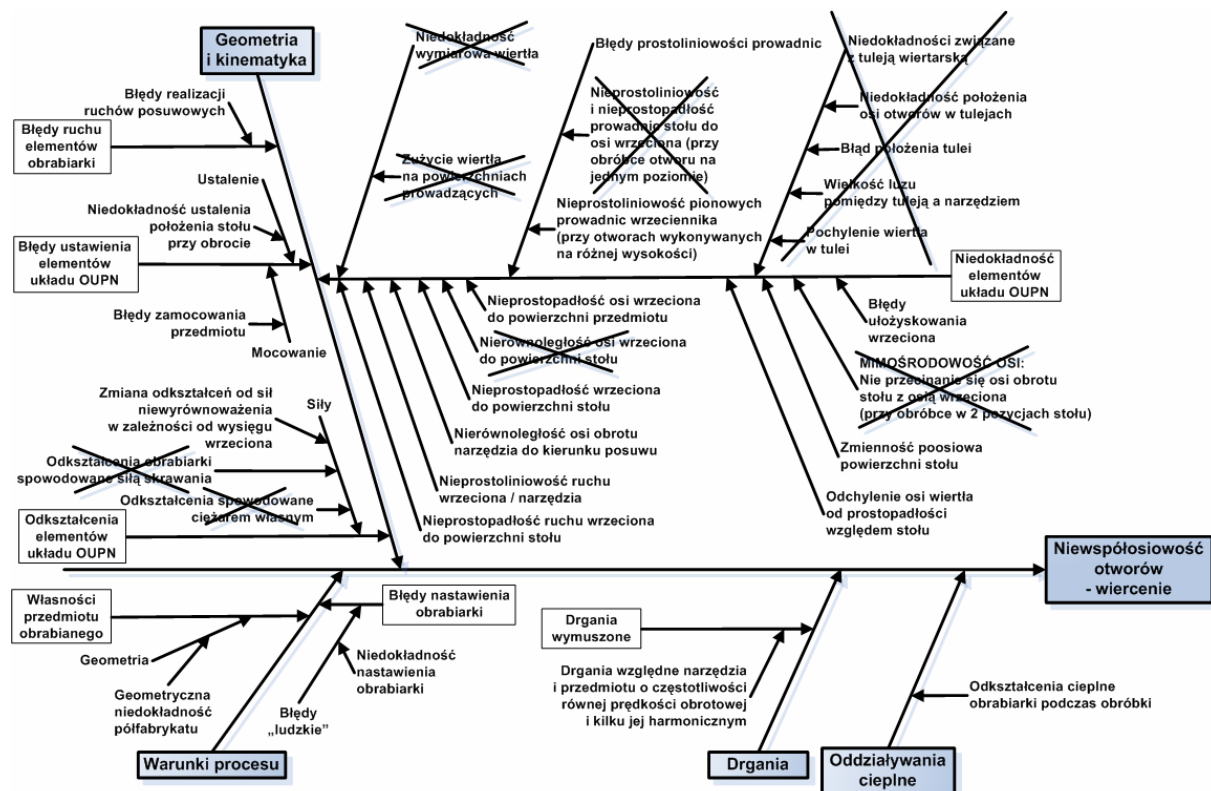
Do identyfikacji potencjalnych przyczyn wpływających na występowanie błędów współosiowości w badanym procesie, wykorzystano opracowane na potrzeby metodyki *Zestawienie potencjalnych przyczyn błędów obróbki skrawaniem*, w formie systemu

ekspertowego (Załącznik B). W ten sposób, w oparciu o zawartą w systemie ekspertowym wiedzę technologiczną, otrzymano zbiór potencjalnych przyczyn błędu współosiowości. Zebrano zarówno przyczyny błędów położenia mające zastosowanie dla wszystkich sposobów obróbki skrawaniem, jak i przyczyny błędów położenia odnoszące się do procesu wiercenia. Ponadto, aby zidentyfikować jak najszerszy zbiór potencjalnych przyczyn analizowanego problemu, oprócz błędów położenia określanych bezpośrednio jako niewspółosiowość otworów, poszukiwaniami objęto także przyczyny błędów położenia (powstających podczas wiercenia) określanych jako: niewłaściwe położenie osi, nierównoległość osi różnych otworów, nieprostokątłość osi otworu do powierzchni czołowej, a także szczególne przypadki błędu niewspółosiowości (pochylenie, mimośrodowość).

Otrzymany zbiór potencjalnych przyczyn błędu współosiowości przedstawiono następnie w formie wykresu przyczynowo-skutkowego (Ishikawy), aby ułatwić ich dalszą analizę.

Wybór najbardziej prawdopodobnych przyczyn, przy użyciu wiedzy procesowej

Z szerokiego zbioru potencjalnych przyczyn błędu współosiowości wybrano następnie przyczyny mające zastosowanie w analizowanym przypadku – przy użyciu wiedzy procesowej (we współpracy z technologiem odpowiedzialnym za analizowany proces) odrzucono przyczyny, które z obiektywnych względów nie miały zastosowania w analizowanym przypadku. W ten sposób otrzymano zawężony zbiór potencjalnych przyczyn (Rysunek 6.19).



Rys.6.19. Zbiór wstępnie zidentyfikowanych potencjalnych przyczyn błędu współosiowości otworów w analizowanym procesie wiercenia – po dokonaniu wstępnej eliminacji

Źródło: opracowanie własne

Ponadto, na tym etapie, postanowiono pozostawić poza planem dalszych analiz dwie ze zidentyfikowanych wstępnie potencjalnych przyczyn badanego problemu, mianowicie:

- odkształcenia cieplne obrabiarki podczas obróbki,
- nieprostoliniowość pionowych przewodnic wrzeciennika.

Przyczyną nie uwzględnienia tych dwóch potencjalnych przyczyn w planie dalszych badań był fakt, że sprawdzenie oddziaływania tych przyczyn wymagałoby zbyt skomplikowanych i kosztownych badań. Te dwie przyczyny pozostawiono zatem poza aktualnym planem badań, skupiając się w pierwszej kolejności na pozostałych wstępnie zidentyfikowanych potencjalnych przyczynach analizowanego błędu obróbki, których sprawdzenie uznano za możliwe do wykonania przy pomocy mniejszego nakładu środków. Jednocześnie, nie wykluczono ewentualnego powrotu do tych dwóch pozostawionych poza aktualnym badaniem potencjalnych przyczyn powstającego błędu obróbki – gdyby okazało się to konieczne – w kolejnych podejmowanych działaniach (projektach doskonalących).

6.3.2. Określenie sposobów sprawdzenia wpływu potencjalnych przyczyn na powstający błąd obróbki

Dla każdej potencjalnej przyczyny bądź grupy przyczyn ze wstępnie zidentyfikowanego zbioru, określono następnie – w oparciu o odpowiednią wiedzę technologiczną i wiedzę procesową (pozyskaną przede wszystkim od technologa zajmującego się analizowanym procesem) – sposoby sprawdzenia czy dana przyczyna rzeczywiście wpływa na powstający w analizowanym procesie błąd współosiowości otworów 1 i 2.

Biorąc pod uwagę aktualne możliwości pomiarowe oraz dostępność odpowiednich środków (specjalistyczne maszyny i urządzenia, ludzie, czas), dla pozostałych, wybranych do badania, potencjalnych przyczyn zaproponowano odpowiednie sposoby sprawdzenia, możliwe do realizacji podczas dalszego toku aktualnego badania. Przyczyny, dla których zaproponowano ten sam sposób sprawdzenia, połączono w odpowiednie grupy. Zaplanowane sposoby sprawdzenia przedstawiono w Tabeli 6.4.

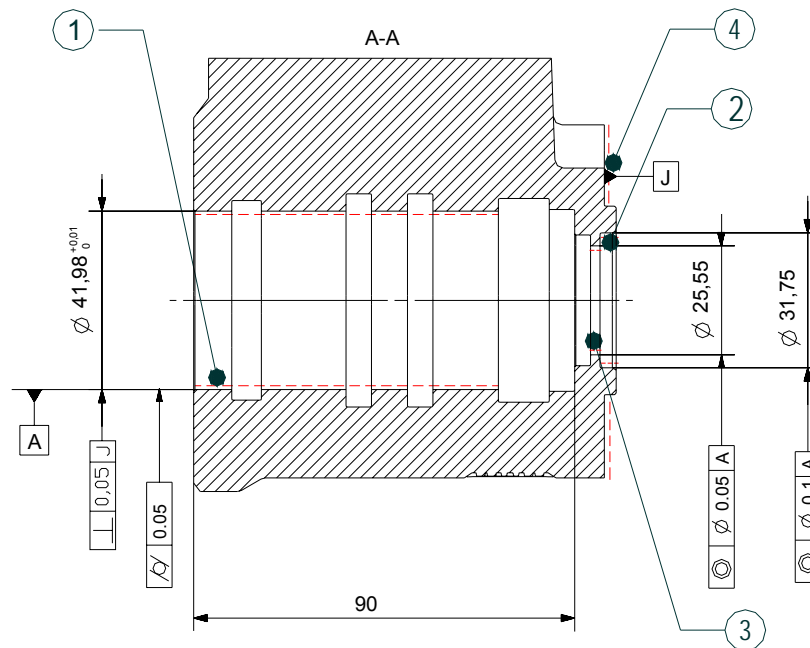
Niektóre z zaproponowanych sposobów sprawdzenia wpływu zidentyfikowanych potencjalnych przyczyn na powstawanie błędu współosiowości otworów 1 i 2 wymagały dokonania pomiaru wartości innych cech wyrobu. Cechy te zaznaczono na Rysunku 6.20.

Tabela 6.4. Zestawienie potencjalnych przyczyn i zaplanowanych sposobów sprawdzenia ich wpływu na powstawanie błędu współosiowości otworów 1 i 2

Potencjalna przyczyna	Sposób sprawdzenia
Geometryczna niedokładność półfabrykatu	1) Sprawdzenie zależności wartości błędu współosiowości otworów 1 i 2 przed i po obróbce w operacji 40, z uwzględnieniem strumieni produkcji
Błędy realizacji ruchów posuwowych	2a) Weryfikacja powtarzalności pozycjonowania obrabiarki poprzez analizę zdolności procesu w odniesieniu do błędu współosiowości otworów 1 i 3 (patrz Rysunek 6.20), stanowiącego miarę powtarzalności pozycjonowania obrabiarki 2b) Sprawdzenie zależności wartości błędu współosiowości otworów 1 i 2 oraz błędu współosiowości otworów 1 i 3, z uwzględnieniem strumieni produkcji
Nieprostopadłość wrzeciona do powierzchni stołu	3) Sprawdzenie zależności wartości błędu

Odchylenie osi wiertła od prostopadłości względem stołu	współosiowości otworów 1 i 2 oraz błędu prostopadłości otworu 1 do powierzchni czołowej korpusu 4 (patrz Rysunek 6.20), z uwzględnieniem strumieni produkcji (dla każdego z wrzecion)
Zmiana odkształceń od sił niewyrównoważenia w zależności od wysięgu wrzeciona	4) Sprawdzenie zależności wartości błędu współosiowości otworów 1 i 2 oraz błędu walcowości otworu 1 (patrz Rysunek 6.20), z uwzględnieniem strumieni produkcji
Błędy łożyskowania wrzeciona	
Nierównoległość osi obrotu narzędzia do kierunku posuwu	
Drgania względne narzędzia i przedmiotu o częstotliwości równej prędkości obrotowej i kilku jej harmonicznym	
Błędy prostoliniowości prowadnic	Sprawdzenie: 4) Zależności wartości błędu współosiowości otworów 1 i 2 oraz błędu walcowości otworu 1 3) Zależności wartości błędu współosiowości otworów 1 i 2 oraz błędu prostopadłości otworu 1 do powierzchni czołowej korpusu 4, z uwzględnieniem strumieni produkcji (dla każdego z wrzecion)
Nieprostoliniowość ruchu wrzeciona / narzędzia	
Nieprostopadłość ruchu wrzeciona do powierzchni stołu	
Niepłaskość („zmiennosc poosiowa”) powierzchni stołu	5) Sprawdzenie zależności wartości błędu współosiowości otworów 1 i 2 oraz błędu prostopadłości otworu 1 do powierzchni czołowej korpusu 4, dla każdego z gniazd mocujących
Niedokładność ustalenia położenia stołu przy obrocie	6) Sprawdzenie czy zmiennosc wartości błędu prostopadłości otworu 1 do powierzchni czołowej korpusu 4, pomiędzy poszczególnymi ustawieniami stołu jest większa niż przeciętna zmiennosc wartości tego błędu w ramach jednego ustawienia stołu
Błędy zamocowania przedmiotu	7) Sprawdzenie wpływu płyt mocujących na wartości błędu współosiowości otworów 1 i 2
Nieprostopadłość osi wrzeciona do powierzchni przedmiotu – jest to przyczyna złożona, obejmująca wpływ: - wrzeciona, - przedmiotu obrabianego, - stołu obrabiarki, - mocowania (płyty mocującej)	Sprawdzenie wpływu tej przyczyny odbywać się będzie poprzez wyżej opisane sposoby sprawdzenia: nr 3, 5, 6, 7
Niedokładność nastawienia obrabiarki	8) Sprawdzenie czy wartości błędu współosiowości otworów 1 i 2 istotnie różnią się pomiędzy poszczególnymi gniazdami mocującymi (także w odniesieniu do wartości przesunięcia osi otworu 1 względem osi otworu 2 w osi x i w osi y) (patrz Rysunek 6.20)

Źródło: opracowanie własne



Rys.6.20. Przekrój korpusu, którego dotyczył analizowany problem

Źródło: opracowanie na podstawie materiałów firmy Sauer-Danfoss sp. z o. o.

W oparciu o zidentyfikowane wstępnie potencjalne przyczyny błędu współosiowości, oraz zaproponowane sposoby sprawdzenia czy przyczyny te rzeczywiście wpływają na powstawanie tego błędu w analizowanym procesie, stwierdzono konieczność zebrania dodatkowych danych, umożliwiających przeprowadzenie odpowiednich analiz.

6.3.3. Zebranie dodatkowych danych

Plan zbierania danych

Zaplanowano ponowne zbieranie danych, uwzględniając zidentyfikowane potencjalne przyczyny powstającego błędu obróbki oraz ustalone sposoby sprawdzenia ich wpływu na badaną cechę. Oprócz współosiowości otworów 1 i 2, dla każdego objętego badaniem wyrobu dokonano również pomiaru (patrz Rysunek 6.20):

- wartości błędu współosiowości otworów 1 i 3,
- wartości błędu prostopadłości otworu 1 do powierzchni czołowej korpusu 4,
- wartości błędu walcowości otworu 1,

zachowując jednocześnie stratyfikację zbieranych danych z uwagi na cztery zidentyfikowane strumienie produkcji (gniazda mocujące).

Zaplanowano przeprowadzenie minimum 60 pomiarów.

Analiza systemu pomiarowego

Pomiary miały zostać przeprowadzone przy użyciu tej samej współrzędnościowej maszyny pomiarowej, która wykorzystana została w poprzednim etapie metodyki. Jednak, z uwagi na fakt, że w nowym planie zbierania danych uwzględniono także inne cechy

wyrobu, konieczne było przeprowadzenie analizy systemu pomiarowego w odniesieniu do tych cech.

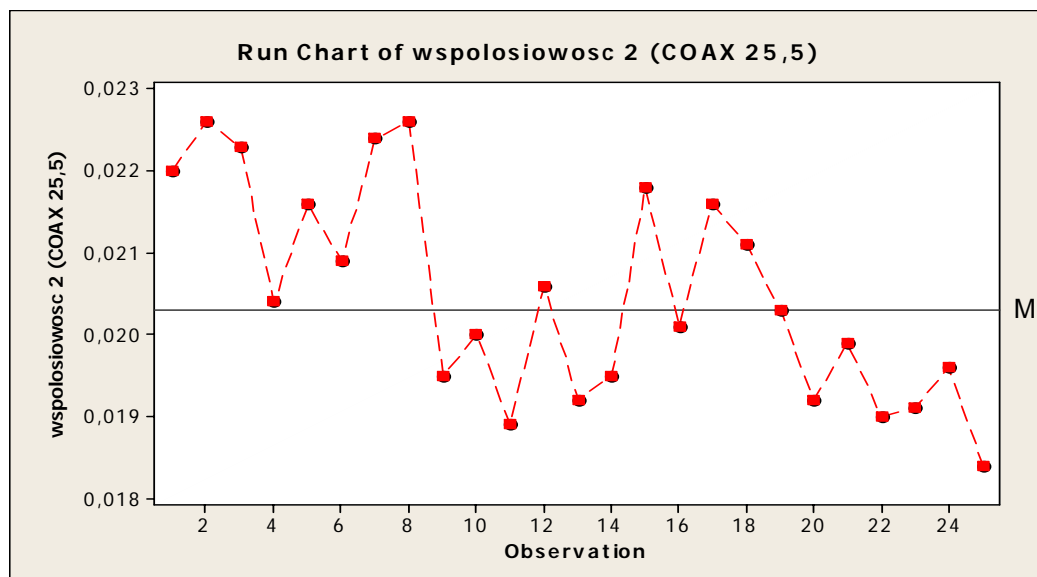
Dla upewnienia się, że system pomiarowy jest odpowiedni do dokonywania zaplanowanych pomiarów, dokonano sprawdzenia zdolności pomiarowej stosowanego systemu (maszyny pomiarowej) w odniesieniu do cech, które miały być mierzone:

- błędu współosiowości otworów 1 i 3,
- błędu prostopadłości otworu 1 do powierzchni czołowej korpusu 4,
- błędu walcowości otworu 1.

Badanie przeprowadzono tą samą metodą, jaką zastosowano w przypadku badania zdolności pomiarowej odnoszącej się do pomiarów błędu współosiowości (patrz Rozdział 6.2.4), za pomocą procedury pozwalającej wyznaczyć wskaźniki zdolności C_g i C_{gk} , w oparciu o pomiary wzorca (Dietrich i Schulze, 2000, s.312-323). W przypadku mierzonych cech (współosiowość, prostopadłość, walcowość), mamy do czynienia z tolerancją jednostronną, dlatego w analizie systemu pomiarowego obliczony został jedynie wskaźnik zdolności C_{gk} .

Współosiowość otworów 1 i 3:

Do badania wybrano wzorec pomiarowy o wartości błędu współosiowości otworów 1 i 3 leżącej możliwie blisko środka pola tolerancji (pomimo, że tolerancja jest tu jednostronna, współosiowość jest cechą naturalnie ograniczoną przez 0, zatem pole tolerancji na potrzeby tego badania określono jako przedział: 0-0,05 [mm]). Dokonano 25 pomiarów wzorca (Rysunek 6.21).



Rys.6.21. Karta przebiegu procesu zawierająca wyniki pomiarów przeprowadzonych w badaniu systemu pomiarowego w odniesieniu do błędu współosiowości otworów 1 i 3

Źródło: opracowanie własne

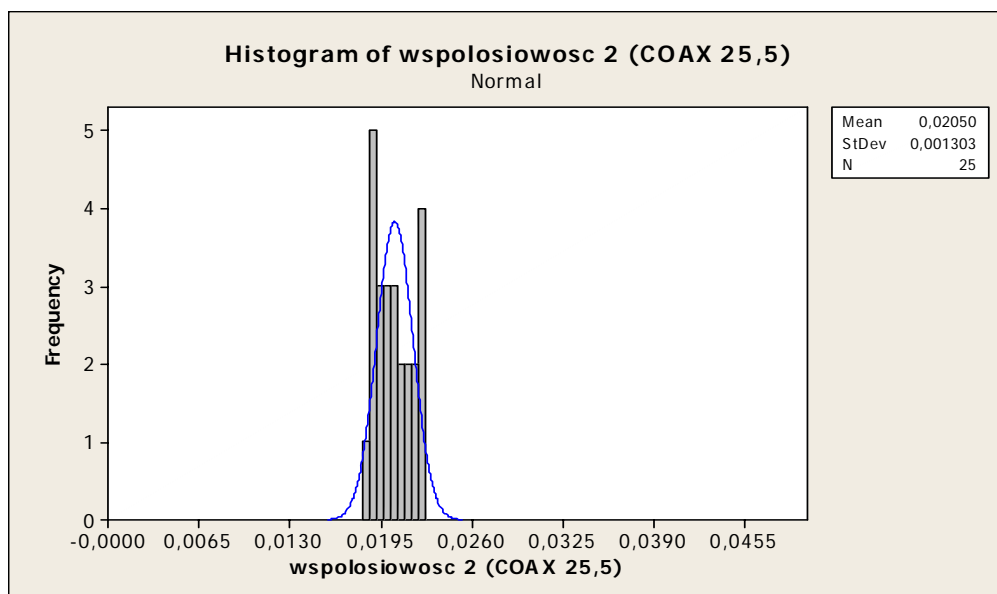
Wskaźnik zdolności C_{gk} (patrz Tabela 6.5) osiągnął wartość 1,15. Wartość ta przekracza przyjmowaną za absolutnie minimalną wartość 1,00, lecz nie przekracza uznawanej często za graniczną wartości 1,33.

Tabela 6.5. Obliczenie wskaźnika zdolności systemu pomiarowego w odniesieniu do błędu współosiowości otworów 1 i 3, na podstawie 25 pomiarów wzorca:

średnia wyników: \bar{x}_g	0,020504
odchylenie standardowe wyników: s_g	0,001303035
rzeczywista wartość wzorca: x_m	0,02
wartość wskaźnika zdolności systemu pomiarowego:	$C_{gk} = \frac{(x_m + 0,1 \cdot T) - \bar{x}_g}{3 \cdot s_g} = \frac{(0,02 + 0,1 \cdot 0,05) - 0,020504}{3 \cdot 0,001303035} = 1,15$

Źródło: opracowanie własne

Na Rysunku 6.22 przedstawiono wyniki pomiarów przeprowadzonych w ramach badania systemu pomiarowego w odniesieniu do pola tolerancji dla analizowanej cechy – błędu współosiowości otworów 1 i 3.



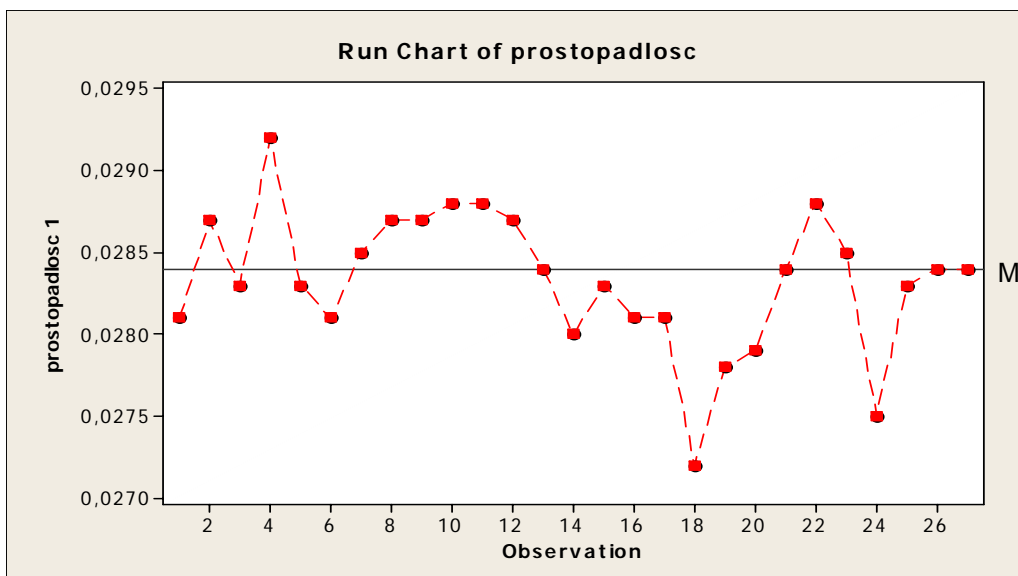
Rys.6.22. Wyniki pomiarów przeprowadzonych w ramach badania systemu pomiarowego w odniesieniu do pola tolerancji dla błędu współosiowości otworów 1 i 3

Źródło: opracowanie własne

Na podstawie przeprowadzonego badania, biorąc pod uwagę parametry mierzonej powierzchni w stosunku do wymaganych dokładności, zdolność stosowanego systemu pomiarowego w odniesieniu do błędu współosiowości otworów 1 i 3 została uznana za wystarczającą na potrzeby dalszych pomiarów tej cechy.

Prostopadłość otworu 1 do powierzchni czołowej korpusu 4:

Do badania wybrano wzorzec pomiarowy o wartości błędu prostopadłości otworu 1 do powierzchni czołowej korpusu 4 leżącej blisko środka pola tolerancji (pomimo, że tolerancja jest tu jednostronna, prostopadłość jest cechą naturalnie ograniczoną przez 0, zatem pole tolerancji na potrzeby tego badania określono jako przedział: 0-0,05 [mm]). Dokonano 27 pomiarów wzorca (Rysunek 6.23).



Rys.6.23. Karta przebiegu procesu zawierająca wyniki pomiarów przeprowadzonych w badaniu systemu pomiarowego w odniesieniu do błędu prostopadłości otworu 1 do powierzchni czołowej korpusu 4

Źródło: opracowanie własne

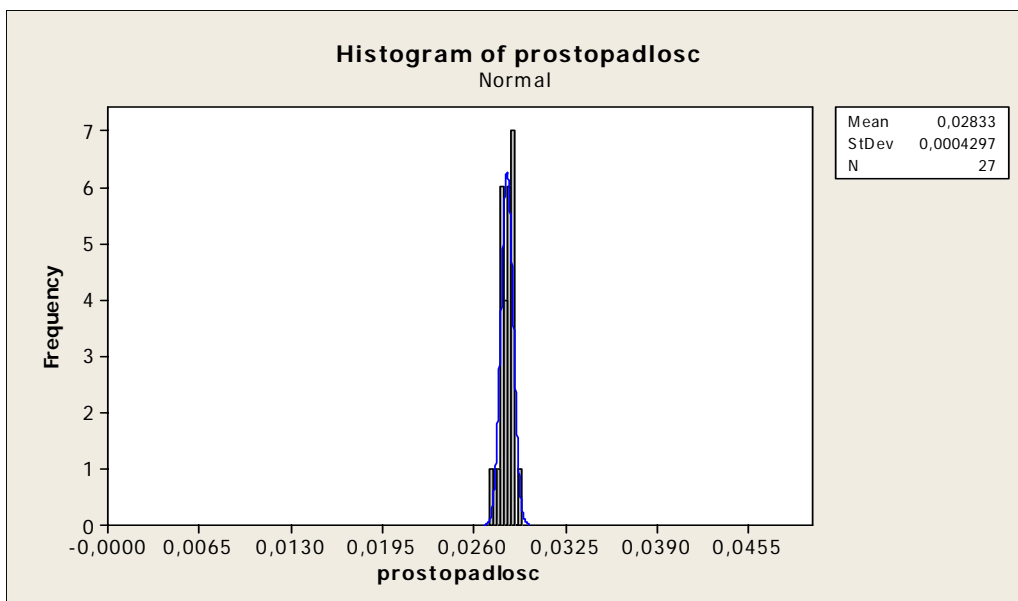
Wskaźnik zdolności C_{gk} (patrz Tabela 6.6) osiągnął wartość 3,62. Wartość ta znacznie przekracza przyjmowaną za graniczną wartość 1,33 (czasem: 1,00).

Tabela 6.6. Obliczenie wskaźnika zdolności systemu pomiarowego w odniesieniu do błędu prostopadłości otworu 1 do powierzchni czołowej korpusu 4, na podstawie 27 pomiarów wzorca:

średnia wyników: \bar{x}_g	0,02833
odchylenie standardowe wyników: s_g	0,000429669
rzeczywista wartość wzorca: x_m	0,0280
wartość wskaźnika zdolności systemu pomiarowego:	$C_{gk} = \frac{(x_m + 0,1 \cdot T) - \bar{x}_g}{3 \cdot s_g} = \frac{(0,028 + 0,1 \cdot 0,05) - 0,02833}{3 \cdot 0,000429669} = 3,62$

Źródło: opracowanie własne

Na Rysunku 6.24 przedstawiono wyniki pomiarów przeprowadzonych w ramach badania systemu pomiarowego w odniesieniu do pola tolerancji dla analizowanej cechy – błędu prostopadłości otworu 1 do powierzchni czołowej korpusu 4.



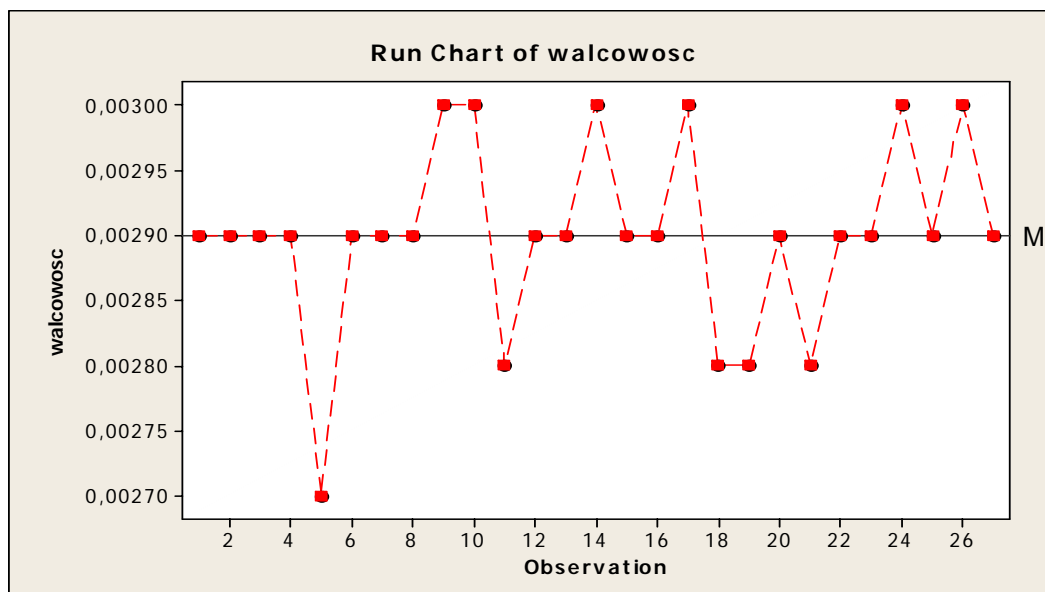
Rys.6.24. Wyniki pomiarów przeprowadzonych w ramach badania systemu pomiarowego w odniesieniu do pola tolerancji dla błędu prostopadłości otworu 1 do powierzchni czołowej korpusu 4

Źródło: opracowanie własne

Na podstawie przeprowadzonego badania, zdolność stosowanego systemu pomiarowego w odniesieniu do błędu prostopadłości otworu 1 do powierzchni czołowej korpusu 4 została uznana za wystarczającą na potrzeby dalszych pomiarów tej cechy.

Walcowość otworu 1:

Do badania wybrano wzorec pomiarowy o wartości błędu walcowości otworu 1 leżącej możliwie blisko środka pola tolerancji (pomimo, że tolerancja jest tu jednostronna, walcowość jest cechą naturalnie ograniczoną przez 0, zatem pole tolerancji na potrzeby tego badania określono jako przedział: 0-0,005 [mm]). Dokonano 27 pomiarów wzorca (Rys. 6.25).



Rys.6.25. Karta przebiegu procesu zawierająca wyniki pomiarów przeprowadzonych w badaniu systemu pomiarowego w odniesieniu do błędu walcowości otworu 1

Źródło: opracowanie własne

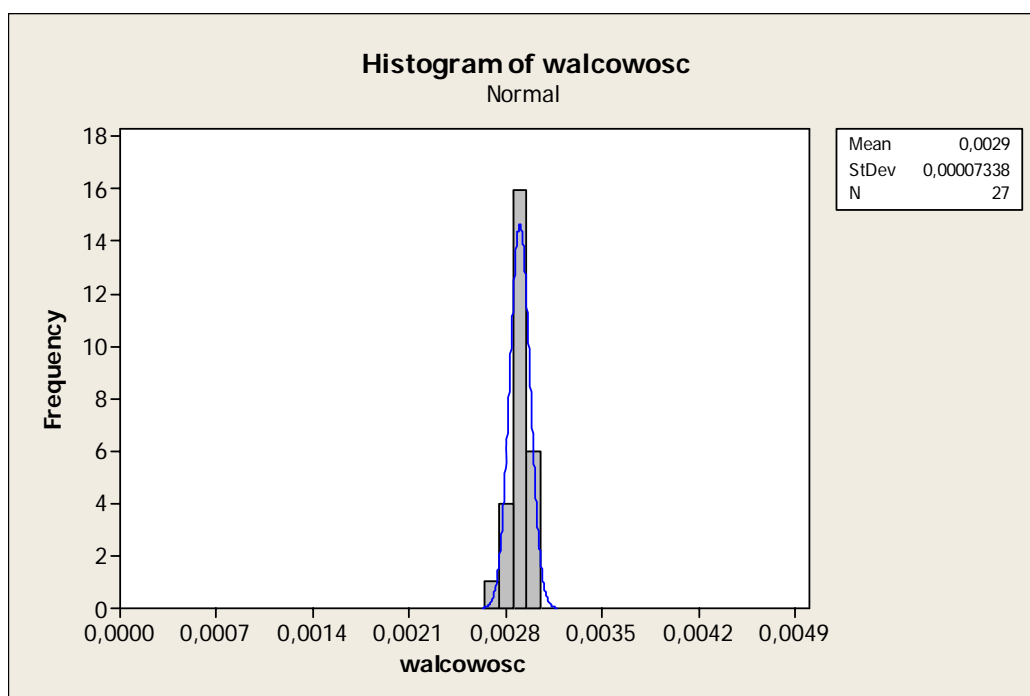
Wskaźnik zdolności C_{gk} (patrz Tabela 6.7) osiągnął wartość 2,27. Wartość ta znacznie przekracza przyjmowaną za graniczną wartość 1,33 (czasem: 1,00).

Tabela 6.7. Obliczenie wskaźnika zdolności systemu pomiarowego w odniesieniu do błędu walcowości otworu 1, na podstawie 27 pomiarów wzorca

średnia wyników: \bar{x}_g	0,0029
odchylenie standardowe wyników: s_g	0,00007338
rzeczywista wartość wzorca: x_m	0,0029
wartość wskaźnika zdolności systemu pomiarowego:	$C_{gk} = \frac{(x_m + 0,1 \cdot T) - \bar{x}_g}{3 \cdot s_g} = \frac{(0,0029 + 0,1 \cdot 0,005) - 0,0029}{3 \cdot 0,00007338} = 2,27$

Źródło: opracowanie własne

Na Rysunku 6.26 przedstawiono wyniki pomiarów przeprowadzonych w ramach badania systemu pomiarowego w odniesieniu do pola tolerancji dla analizowanej cechy – błędu walcowości otworu 1.



Rys.6.26. Wyniki pomiarów przeprowadzonych w ramach badania systemu pomiarowego w odniesieniu do pola tolerancji dla błędu walcowości otworu 1

Źródło: opracowanie własne

Na podstawie przeprowadzonego badania, zdolność stosowanego systemu pomiarowego w odniesieniu do błędu walcowości otworu 1 została uznana za wystarczającą na potrzeby dalszych pomiarów tej cechy.

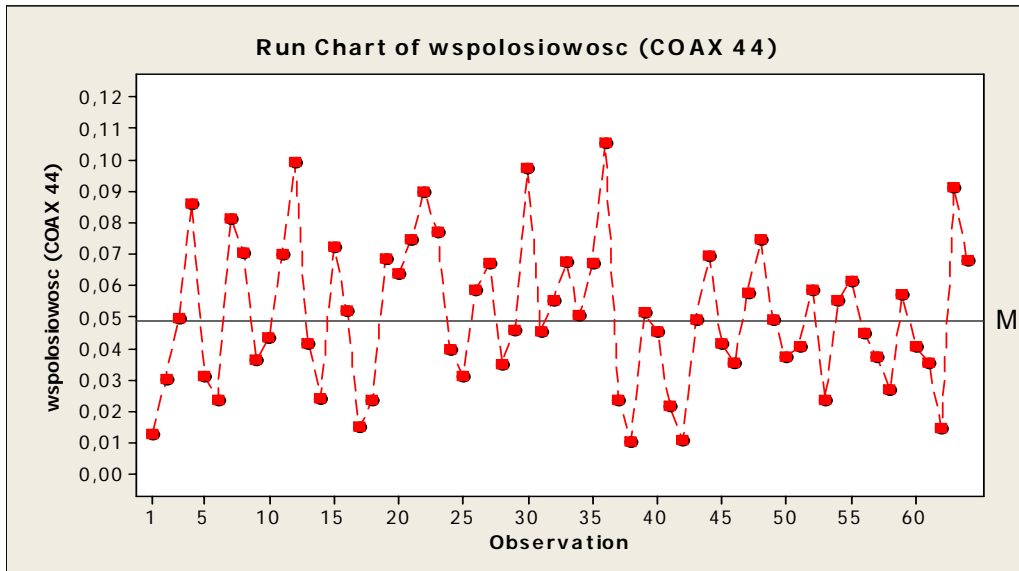
Zbieranie danych

Przeprowadzono zbieranie danych, zgodnie z ustalonym wcześniej planem. Zebrano 64 dane. Pomiarów dokonywano w maju 2009 roku.

6.3.4. Ponowne sprawdzenie stabilności procesu, z uwzględnieniem strumieni produkcji

Ponieważ od czasu, gdy zebrana została pierwsza seria pomiarów minęło kilka miesięcy, zdecydowano o ponownym przeprowadzeniu sprawdzenia stabilności analizowanego procesu.

W celu sprawdzenia stabilności procesu ponownie użyto karty przebiegu procesu (Rysunek 6.27) oraz trzech testów stosowanych dla kart przebiegu (patrz Rozdział 6.2.7).



Rys.6.27. Karta przebiegu procesu dla wyników pomiarów odchyłki współosiowości otworów 1 i 2 (maj 2009)

Źródło: opracowanie własne

Porównanie wartości uzyskanych i granicznych przedstawiono w Tabeli 6.8. W niektórych z wykorzystanych tabel nie zostały ujęte informacje odnoszące się do zbioru danych liczącego 64 wartości, dlatego przytoczono tu wartości graniczne dla zbioru 50 danych.

Tabela 6.8. Zestawienie wartości uzyskanych i granicznych, w ramach trzech testów stabilności stosowanych dla kart przebiegu procesu, w odniesieniu do wyników pomiarów odchyłki współosiowości otworów 1 i 2 (maj 2009)

Wartości uzyskane	Wartości graniczne (według: Pyzdek, 2001, s.308-310)
maksymalna długość przebiegu	
5	10 (dla 50 danych)
liczba przebiegów	
30	od 19 do 32 (dla 50 danych)
najdłuższy przebieg wznoszący lub opadający	
3	6

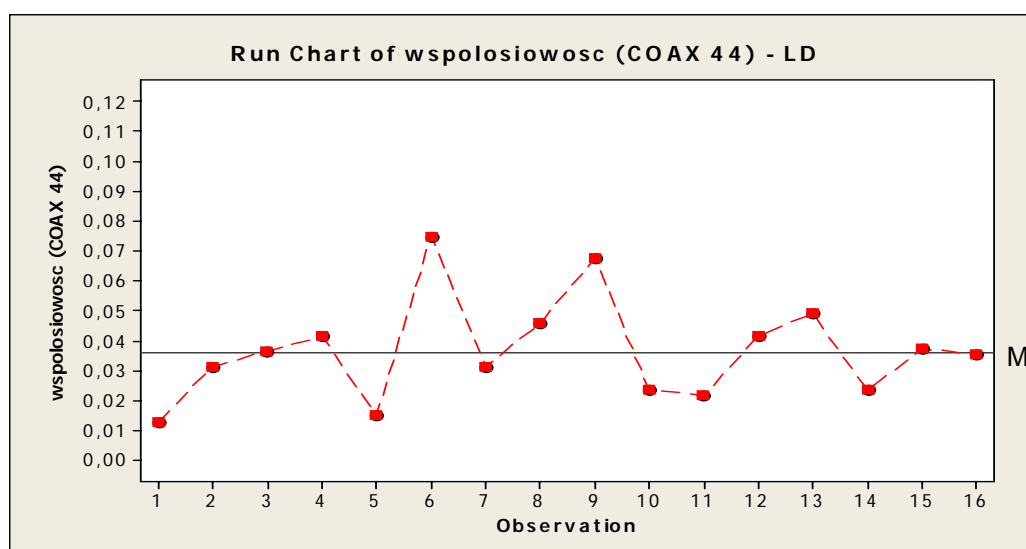
Źródło: opracowanie własne

Na podstawie oceny wzrokowej karty przebiegu, oraz przeprowadzonych testów, proces uznano za stabilny – będący pod wpływem wyłącznie przyczyn losowych.

Analiza stabilności strumieni produkcji

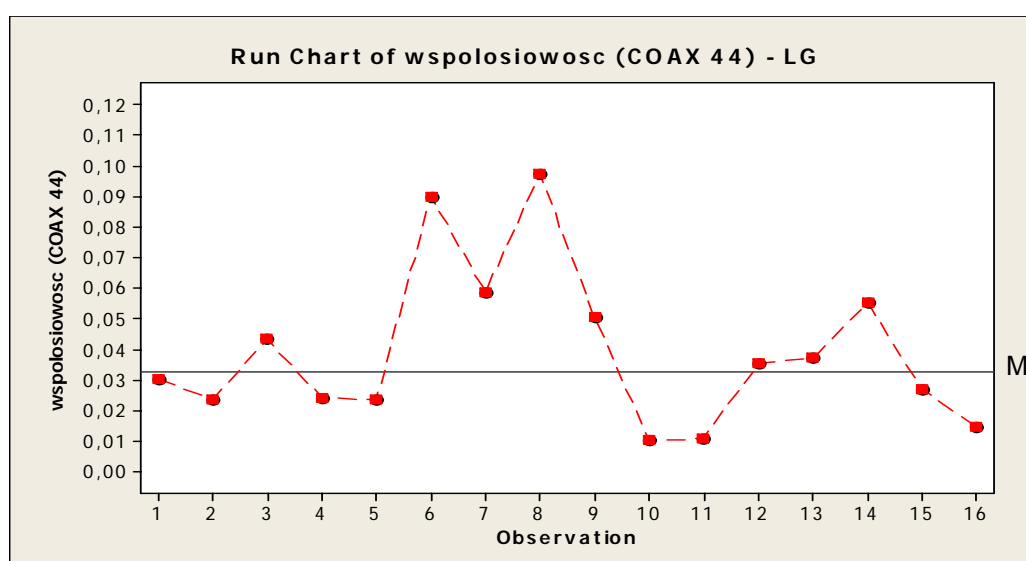
Tak jak przy poprzednim sprawdzeniu, ponownie zastosowana stratyfikacja zebranych danych umożliwiła ich podział zgodnie ze zidentyfikowanymi strumieniami produkcji – według gniazd, w których zamocowane są korpusy podczas obróbki.

Dla każdego z czterech zidentyfikowanych strumieni (dla których zebrano po 16 pomiarów) – odpowiednio gniazdo lewe dolne (LD), lewe górne (LG), prawe górne (PG), prawe dolne (PD) – sprawdzono stabilność procesu. W tym celu ponownie zastosowano – tak jak dla całego zbioru danych – karty przebiegu procesu (Rysunki 6.28 – 6.31) oraz trzy podstawowe testy dla kart przebiegu (Tabela 6.9). W jednej z wykorzystanych tabel nie zostały ujęte informacje odnoszące się do zbioru danych liczącego 16 wartości, dlatego przytoczono tu wartości graniczne dla zbioru 15 danych.



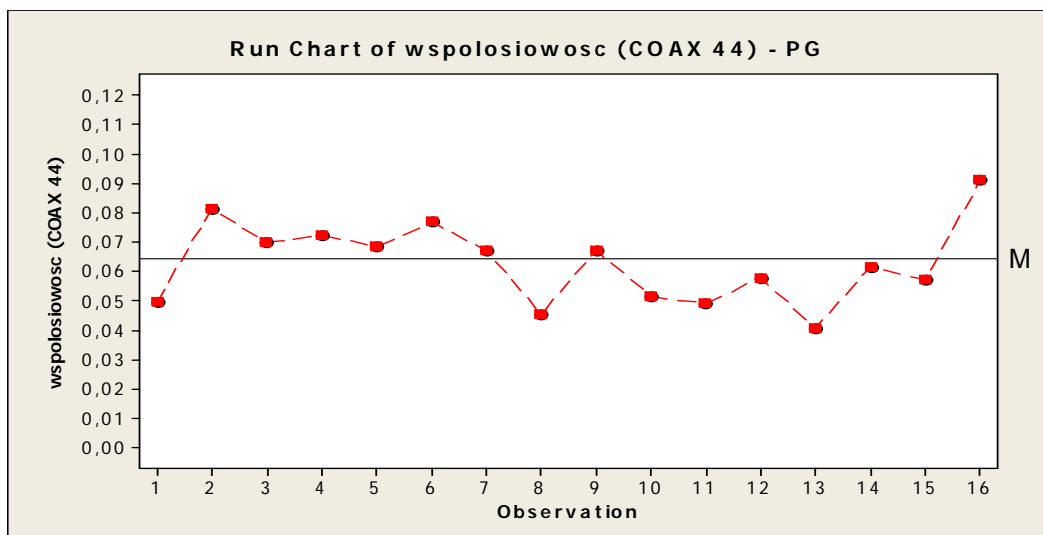
Rys.6.28. Karta przebiegu procesu dla wyników pomiarów odchyłki współosiowości otworów 1 i 2 – gniazdo lewe dolne (LD) – (maj 2009)

Źródło: opracowanie własne



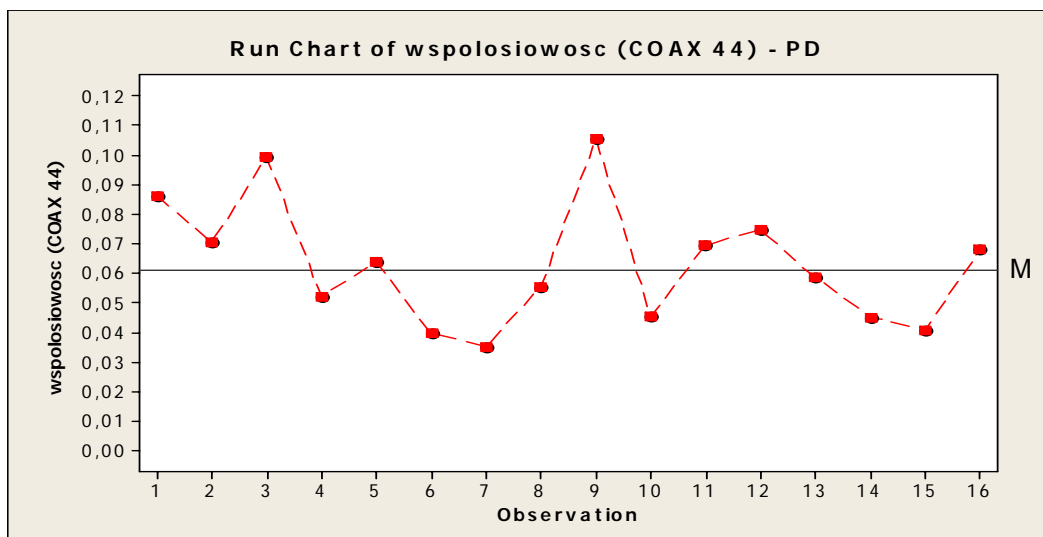
Rys.6.29. Karta przebiegu procesu dla wyników pomiarów odchyłki współosiowości otworów 1 i 2 – gniazdo lewe górne (LG) – (maj 2009)

Źródło: opracowanie własne



Rys.6.30. Karta przebiegu procesu dla wyników pomiarów odchyłki współosiowości otworów 1 i 2 – gniazdo prawe górne (PG) – (maj 2009)

Źródło: opracowanie własne



Rys.6.31. Karta przebiegu procesu dla wyników pomiarów odchyłki współosiowości otworów 1 i 2 – gniazdo prawe dolne (PD) – (maj 2009)

Źródło: opracowanie własne

Tabela 6.9. Zestawienie wartości uzyskanych i granicznych, w ramach trzech testów stabilności stosowanych dla kart przebiegu procesu, w odniesieniu do wyników pomiarów odchyłki współosiowości otworów 1 i 2 – dla każdego z czterech wyróżnionych strumieni produkcji (maj 2009)

Wartości uzyskane - gniazdo lewe dolne (LD)	Wartości uzyskane - gniazdo lewe górne (LG)	Wartości uzyskane - gniazdo prawe górne (PG)	Wartości uzyskane - gniazdo prawe dolne (PD)	Wartości graniczne (według: Pyzdek, 2001, s.308-310)
maksymalna długość przebiegu				
2	4	6	3	6 (dla 15 danych)
liczba przebiegów				
11	7	6	9	od 5 do 12
najdłuższy przebieg wznoszący lub opadający				
3	4	2	3	5

Źródło: opracowanie własne

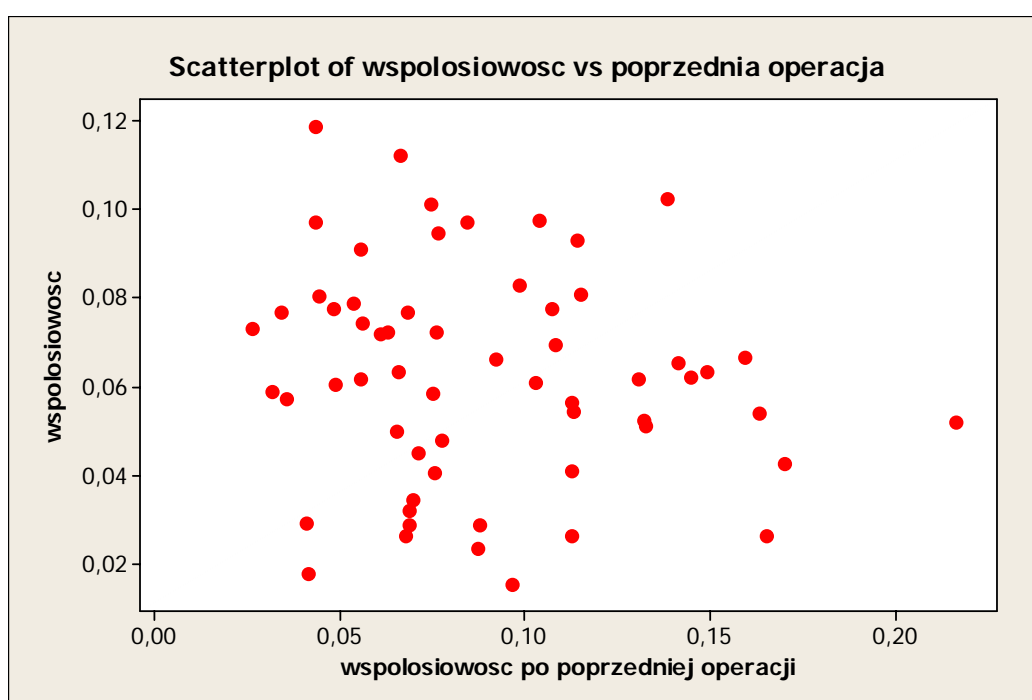
Na podstawie oceny wzrokowej kart przebiegu, oraz przeprowadzonych testów, wszystkie cztery wyróżnione strumienie produkcji uznano za stabilne – nie będące pod wpływem przyczyn specjalnych zmienności. Ponieważ proces uznano za stabilny, możliwe było przejście do kolejnego kroku metodyki.

6.3.5. Wstępna analiza wybranych potencjalnych przyczyn

Zgodnie z zaleceniami przedstawionymi w opisie opracowanej metodyki, działania zawarte w bloku *Wstępna analiza wybranych potencjalnych przyczyn* przeprowadzono w odniesieniu do każdej ze zidentyfikowanych i przeznaczonych do sprawdzenia potencjalnych przyczyn lub grup przyczyn analizowanego błędu obróbki. Przystąpiono do analiz, zgodnie z określonymi wcześniej (Tab. 6.4) sposobami sprawdzenia wpływu potencjalnych przyczyn na powstawanie błędu współosiowości.

1) Sprawdzenie zależności wartości błędu współosiowości otworów 1 i 2 przed i po obróbce w operacji 40, z uwzględnieniem strumieni produkcji

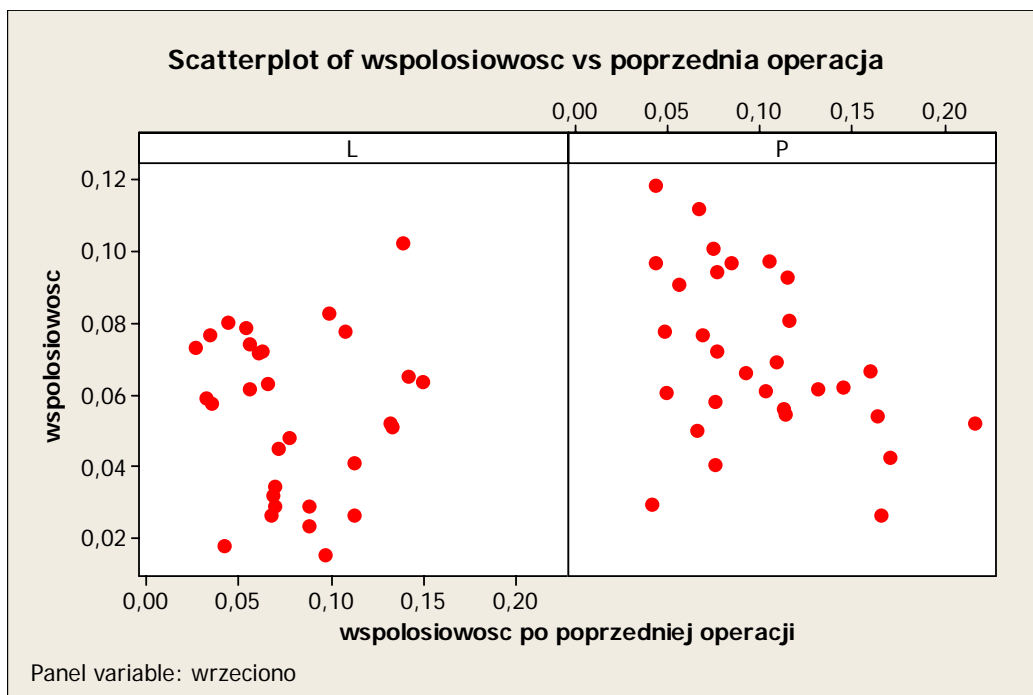
Bazując na danych zebranych w pierwszej serii pomiarów (styczeń 2009), sporządzono wykres rozproszenia – zgodnie z algorytmem opracowanej metodyki (Rys. 4.15) przeznaczony do analizy potencjalnej przyczyny reprezentowanej przez dane ciągłe – obrazujący zależność wartości błędu współosiowości otworów 1 i 2 przed przeprowadzeniem operacji 40 (po operacji 10) i po operacji 40 (Rysunek 6.32).



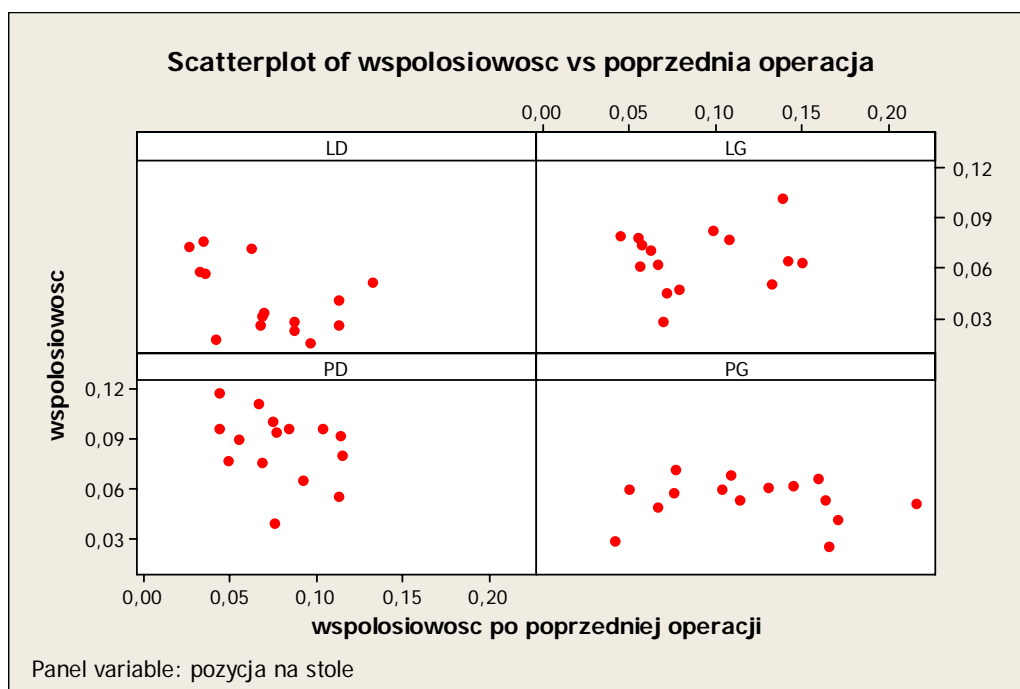
Rys.6.32. Wykres rozproszenia: odchyłki współosiowości otworów 1 i 2 przed i po przeprowadzeniu operacji 40

Źródło: opracowanie własne

Biorąc pod uwagę zidentyfikowane strumienie produkcji, sporządzono także odpowiednie wykresy rozproszenia z podziałem na wrzeczona (Rysunek 6.33) i gniazda mocujące (Rysunek 6.34).



Rys.6.33. Wykres rozproszenia: odchyłki współosiowości otworów 1 i 2 przed i po przeprowadzeniu operacji 40 – dla każdego z dwóch wrzecion (L –lewe, P –prawe)
 Źródło: opracowanie własne



Rys.6.34. Wykres rozproszenia: odchyłki współosiowości otworów 1 i 2 przed i po operacji 40 – dla każdego z czterech gniazd mocujących

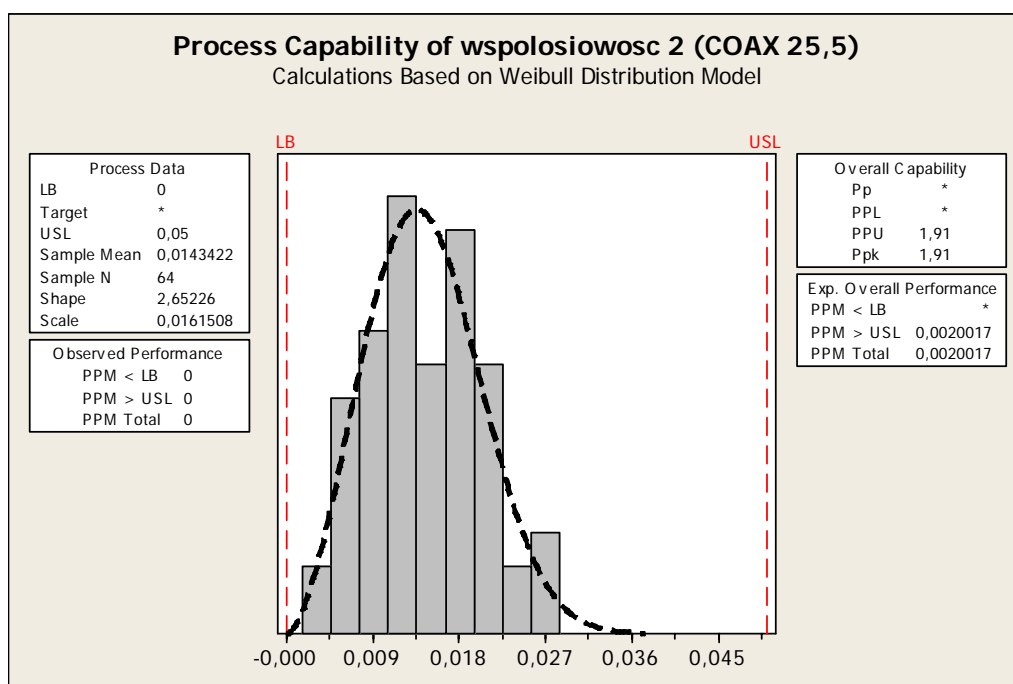
Źródło: opracowanie własne

Ponieważ na żadnym ze sporządzonych wykresów rozproszenia nie zauważono wyraźnej zależności liniowej pomiędzy zmiennymi, uznano zatem, że nie ma wystarczających dowodów, aby uznać, że geometryczna niedokładność półfabrykatu, wynikająca z wcześniejszej obróbki, jest bezpośrednią przyczyną uzyskiwanego ostatecznie błędu współosiowości otworów 1 i 2. Przyczynę tę wykluczono z dalszych badań.

2a) Weryfikacja powtarzalności pozycjonowania obrabiarki, poprzez analizę zdolności procesu w odniesieniu do błędu współosiowości otworów 1 i 3

Aby dokonać sprawdzenia czy w obrabiarce występują błędy realizacji ruchów posuwowych, zidentyfikowano możliwość zweryfikowania powtarzalności pozycjonowania obrabiarki, poprzez zbadanie zdolności procesu w odniesieniu do błędu współosiowości otworów 1 i 3 (ponieważ są one wykonywane w jednej operacji, z zachowaniem tych samych baz).

Wyniki badania zdolności procesu w odniesieniu do błędu współosiowości otworów 1 i 3 przedstawiono na Rysunku 6.35.



Rys.6.35. Analiza zdolności procesu w odniesieniu do błędu współosiowości otworów 1 i 3

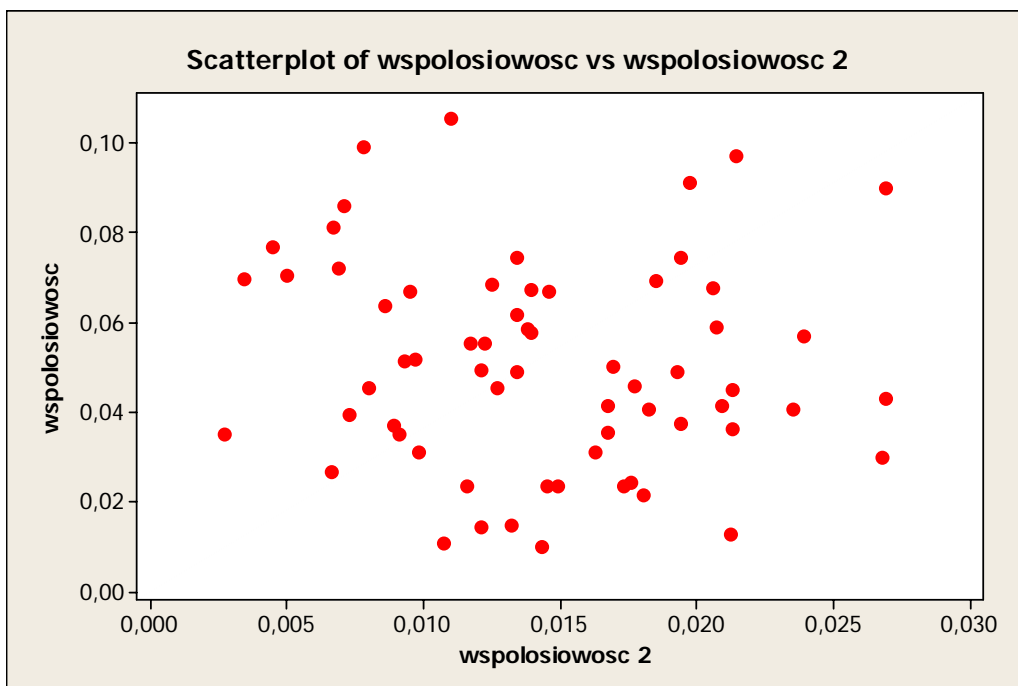
Źródło: opracowanie własne

Wskaźnik zdolności procesu P_{pk} osiąga wartość **1,91** i wskazuje, że proces spełnia stawiane przed nim wymagania (wartość wskaźnika przekracza uznawaną za graniczną wartość 1,00). Proces w odniesieniu do analizowanej cechy jest zdolny. Na tej podstawie stwierdzono, że powtarzalność pozycjonowania obrabiarki może być uznana za wystarczającą.

2b) Sprawdzenie zależności wartości błędu współosiowości otworów 1 i 2 oraz błędu współosiowości otworów 1 i 3, z uwzględnieniem strumieni produkcji

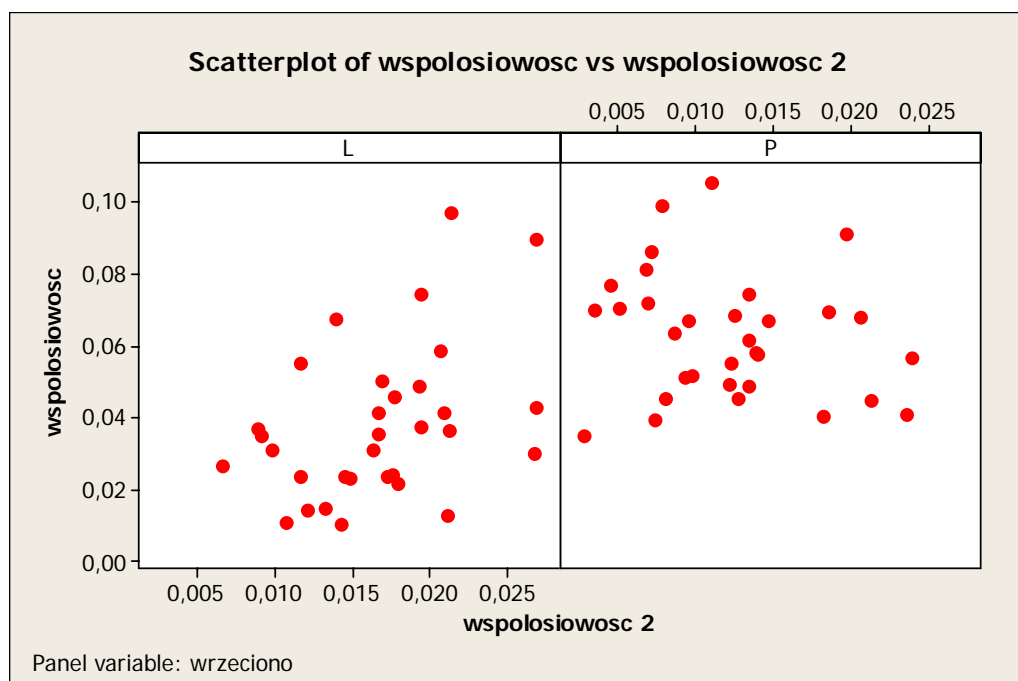
Dodatkowo, w celu sprawdzenia czy ewentualny błąd powtarzalności pozycjonowania obrabiarki (za którego miarę uznano wartość błędu współosiowości otworów 1 i 3) ma związek z badanym błędem współosiowości otworów 1 i 2, przeprowadzono badanie zależności tych dwóch zmiennych.

Aby sprawdzić czy pomiędzy wartościami błędu współosiowości otworów 1 i 2 oraz błędem współosiowości otworów 1 i 3 istnieje zależność, sporządzono odpowiednie wykresy rozproszenia – dla wszystkich danych (Rysunek 6.36), a także dla każdego z dwóch wrzecion (Rysunek 6.37) i dla każdego z czterech gniazd mocujących (Rysunek 6.38).



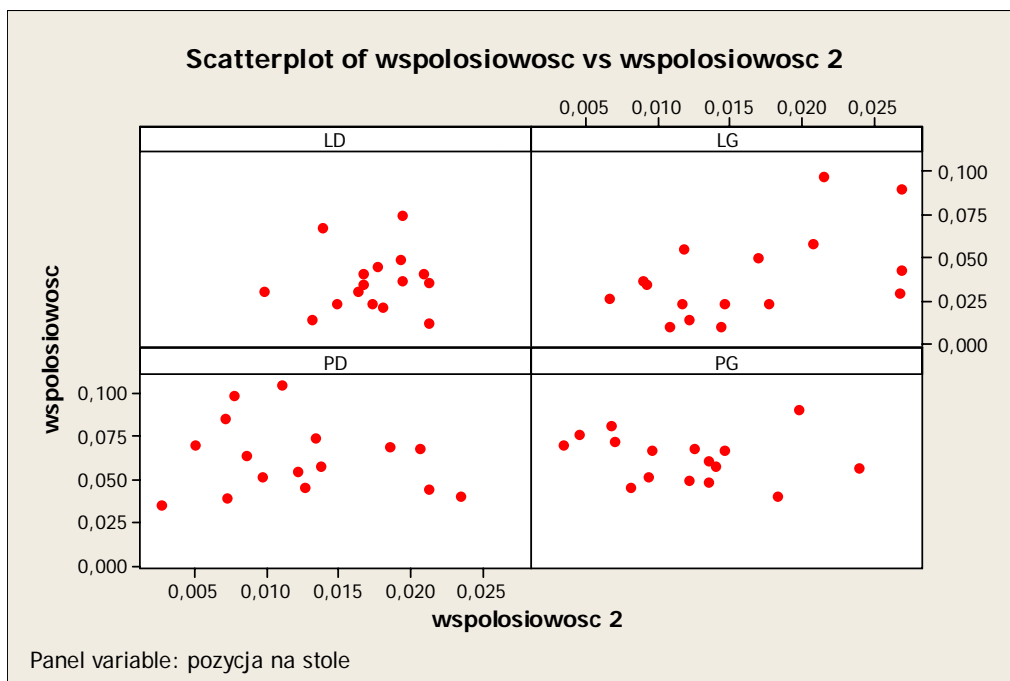
Rys.6.36. Wykres rozproszenia: odchyłki współosiowości otworów 1 i 2 oraz odchyłki współosiowości otworów 1 i 3 („współosiowość 2”)

Źródło: opracowanie własne



Rys.6.37. Wykres rozproszenia: odchyłki współosiowości otworów 1 i 2 oraz odchyłki współosiowości otworów 1 i 3 („współosiowość 2”) – dla każdego z dwóch wrzecion (L – lewe, P – prawe)

Źródło: opracowanie własne

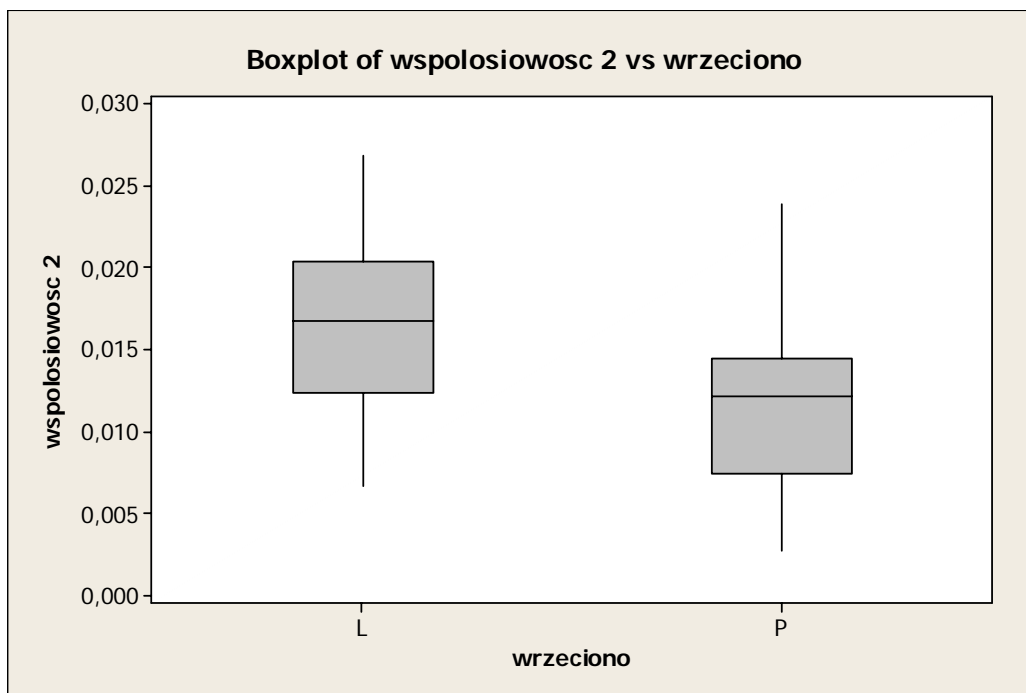


Rys.6.38. Wykres rozproszenia: odchyłki współosiowości otworów 1 i 2 oraz odchyłki współosiowości otworów 1 i 3 („współosiowość 2”) – dla każdego z czterech gniazd mocujących

Źródło: opracowanie własne

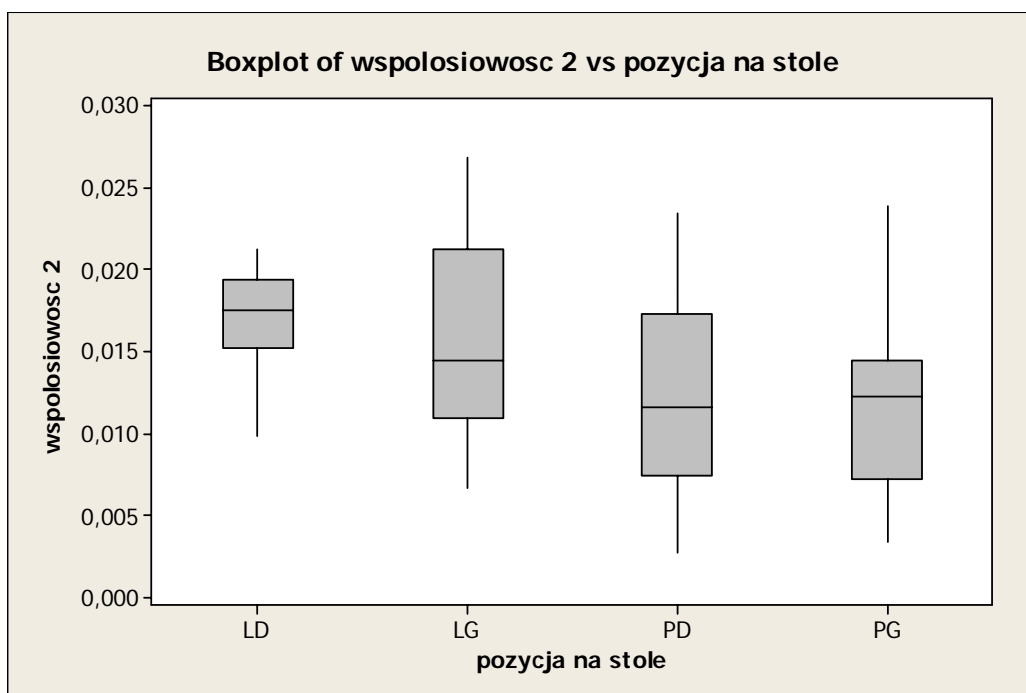
Uznano, że na podstawie oceny wzrokowej sporządzonych wykresów rozproszenia nie można wykluczyć istnienia pewnej umiarkowanej zależności pomiędzy wartościami błędu współosiowości otworów 1 i 2 oraz błędu współosiowości otworów 1 i 3, szczególnie w odniesieniu do wrzeciona lewego.

Dodatkowo, w celu sprawdzenia czy pomiędzy wartościami błędu współosiowości otworów 1 i 3 uzyskiwanymi w ramach wyróżnionych strumieni produkcji (dwa wrzeciona, cztery gniazda) istnieją widoczne różnice, posłużono się wykresem pudełkowym, umożliwiającym porównanie stratyfikowanych danych (Rysunki 6.39 i 6.40).



Rys.6.39. Wykres pudełkowy: odchyłki współosiowości otworów 1 i 3 („współosiowość 2”) – dla każdego z dwóch wrzecion (L – lewe, P – prawe)

Źródło: opracowanie własne



Rys.6.40. Wykres pudełkowy: odchyłki współosiowości otworów 1 i 3 („współosiowość 2”) – dla każdego z czterech gniazd mocujących

Źródło: opracowanie własne

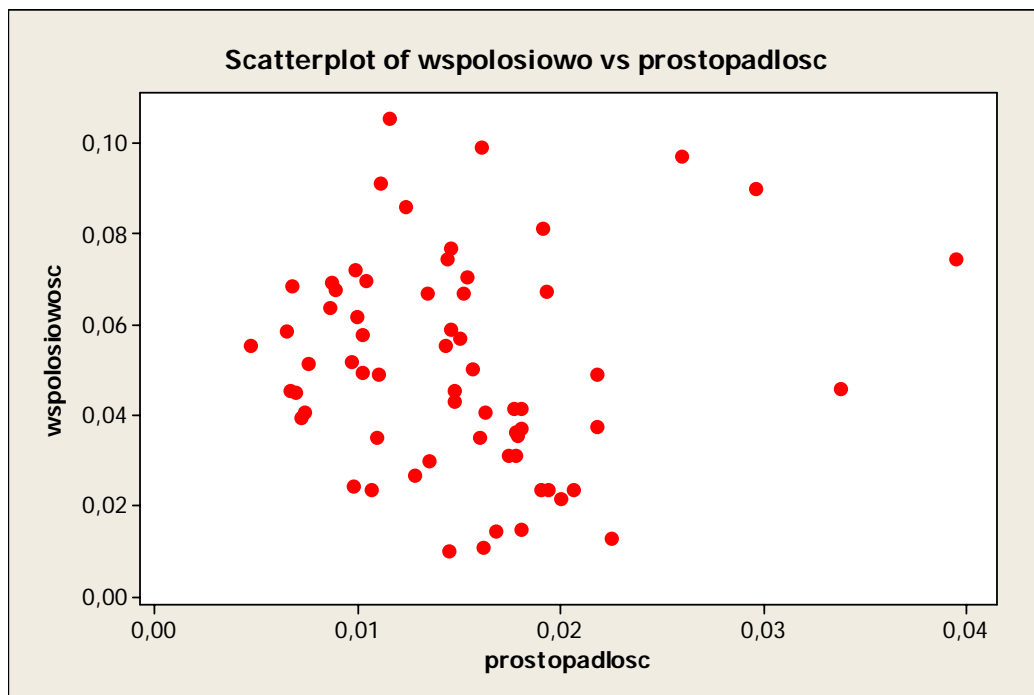
Ponieważ, na podstawie oceny wzrokowej sporządzonych wykresów (Rys. 6.36-6.40), uznano że nie można wykluczyć zarówno istnienia umiarkowanej zależności pomiędzy wartościami błędu współosiowości otworów 1 i 2 oraz błędu współosiowości otworów 1 i 3, jak i pewnych różnic pomiędzy uzyskiwanymi średnio wartościami błędu współosiowości otworów 1 i 3 w ramach poszczególnych strumieni produkcji (szczególnie pomiędzy

wrzcieniem lewym a prawym), dlatego błędy realizacji ruchów posuwowych pozostawiono w zbiorze prawdopodobnych przyczyn powstawania badanego błędu obróbki i przeznaczono do dalszych badań.

3) Sprawdzenie zależności wartości błędu współosiowości otworów 1 i 2 oraz błędu prostopadłości otworu 1 do powierzchni czołowej korpusu 4, z uwzględnieniem strumieni produkcji

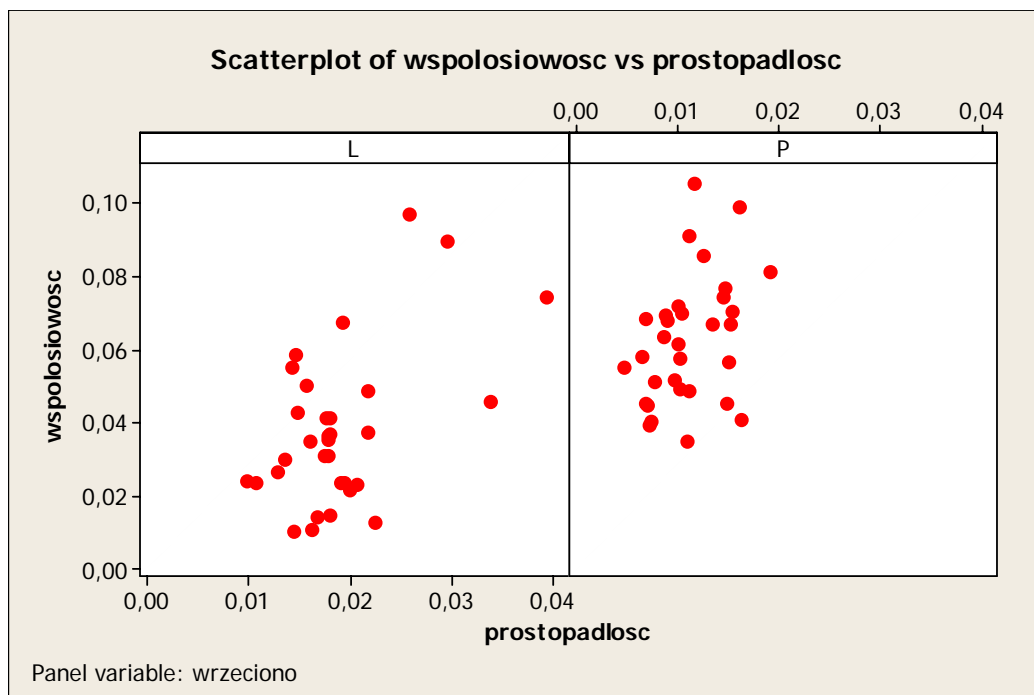
W celu sprawdzenia czy ewentualne niedokładności związane z nieprostopadłą pozycją narzędzia mają związek z badanym błędem współosiowości otworów 1 i 2, przeprowadzono badanie zależności wartości tego błędu oraz błędu prostopadłości otworu 1 do powierzchni czołowej korpusu 4.

Aby sprawdzić czy pomiędzy wartościami błędu współosiowości otworów 1 i 2 oraz błędem prostopadłości otworu 1 do powierzchni czołowej korpusu 4 istnieje zależność, sporządzono odpowiednie wykresy rozproszenia – dla wszystkich danych (Rysunek 6.41), a także dla każdego z dwóch wrzecion (Rysunek 6.42).



Rys.6.41. Wykres rozproszenia: odchyłki współosiowości otworów 1 i 2 oraz odchyłki prostopadłości otworu 1 do powierzchni czołowej korpusu 4

Źródło: opracowanie własne

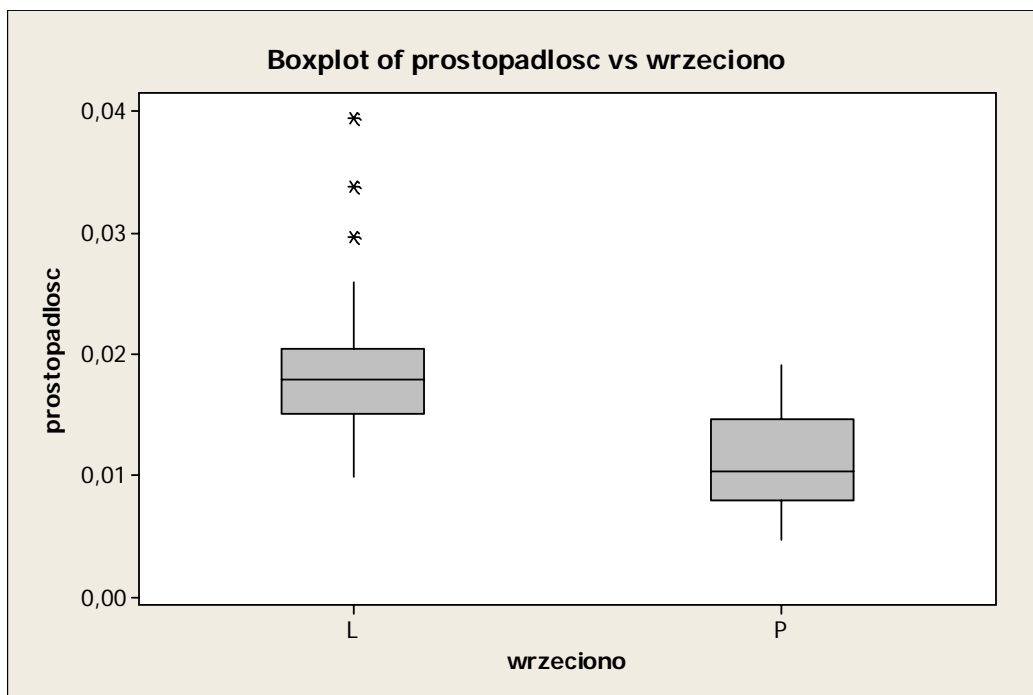


Rys.6.42. Wykres rozproszenia: odchyłki współosiowości otworów 1 i 2 oraz odchyłki prostopadłości otworu 1 do powierzchni czołowej korpusu 4 – dla każdego z dwóch wrzecion (L – lewe, P – prawe)

Źródło: opracowanie własne

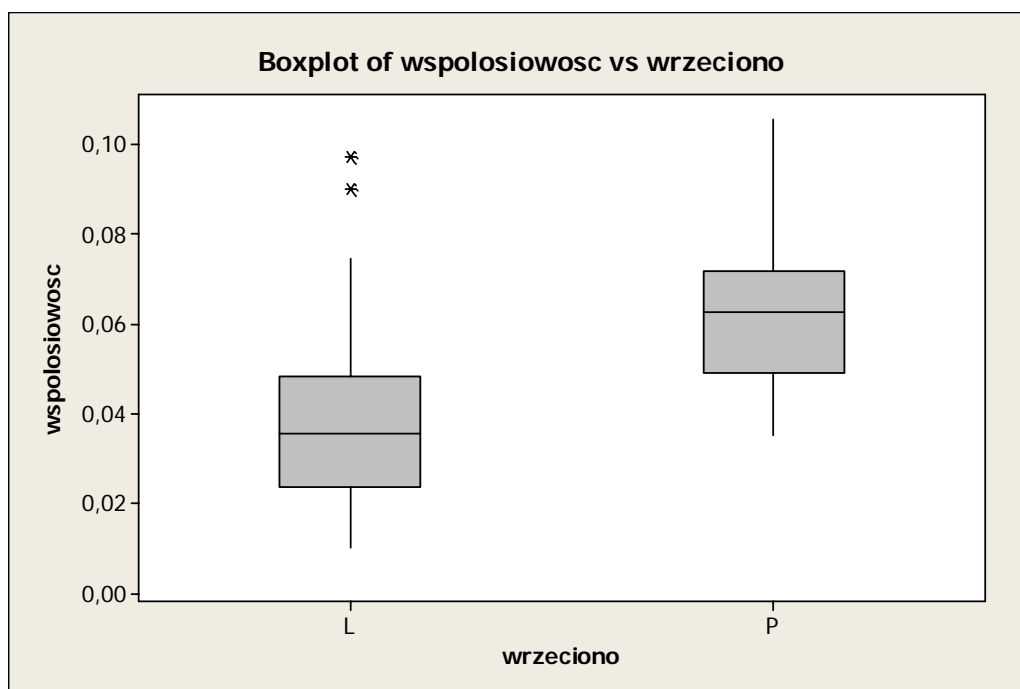
Ocena wzrokowa sporządzonych wykresów rozproszenia – zwłaszcza w odniesieniu do poszczególnych wrzecion – nie pozwala wykluczyć istnienia pewnej (umiarkowanej) zależności pomiędzy wartościami błędu współosiowości otworów 1 i 2 oraz błędu prostopadłości otworu 1 do powierzchni czołowej korpusu 4. Zależność ta w głównej mierze wydaje się być spowodowana punktami „odstającymi” (ang. *outliers*), o wysokich wartościach błędu prostopadłości i współosiowości.

Aby sprawdzić, czy pomiędzy wartościami błędu współosiowości otworów 1 i 2 oraz błędu prostopadłości otworu 1 do powierzchni czołowej korpusu 4, powstającymi w ramach dwóch wyróżnionych strumieni produkcji (wrzeciono lewe i prawe) istnieją widoczne różnice, posłużono się wykresem pudełkowym, umożliwiającym porównanie stratyfikowanych danych (Rysunki 6.43 i 6.44).



Rys.6.43. Wykres pudełkowy: odchyłki prostopadłości otworu 1 do powierzchni czołowej korpusu 4 – dla każdego z dwóch wrzecion (L – lewe, P – prawe)

Źródło: opracowanie własne



Rys.6.44. Wykres pudełkowy: odchyłki współosiowości otworów 1 i 2 – dla każdego z dwóch wrzecion (L – lewe, P – prawe)

Źródło: opracowanie własne

Porównanie (na podstawie oceny wzrokowej sporządzonych wykresów) wyników pomiarów błędu prostopadłości otworu 1 do powierzchni czołowej korpusu 4 oraz błędu współosiowości otworów 1 i 2, uzyskanych dla każdego z dwóch wrzecion, pozwala zauważyć, że podczas gdy średnio większe wartości błędu prostopadłości uzyskano przy obróbce wrzecionem lewym, to jednocześnie wartości błędu współosiowości dla wrzeciona

lewego są średnio mniejsze niż dla wrzeciona prawego. Wydaje się to zatem zaprzeczać istnieniu bezpośredniej zależności liniowej pomiędzy wartościami błędu prostopadłości otworu 1 do powierzchni czołowej korpusu 4 a wartościami błędu współosiowości otworów 1 i 2 w obrębie działania każdego z wrzecion. Być może zaobserwowane na Rysunku 6.42 oznaki zależności są czysto przypadkowe i wywołane są jedynie obecnością punktów „odstających”, widocznych również na Rysunkach 6.43 i 6.44.

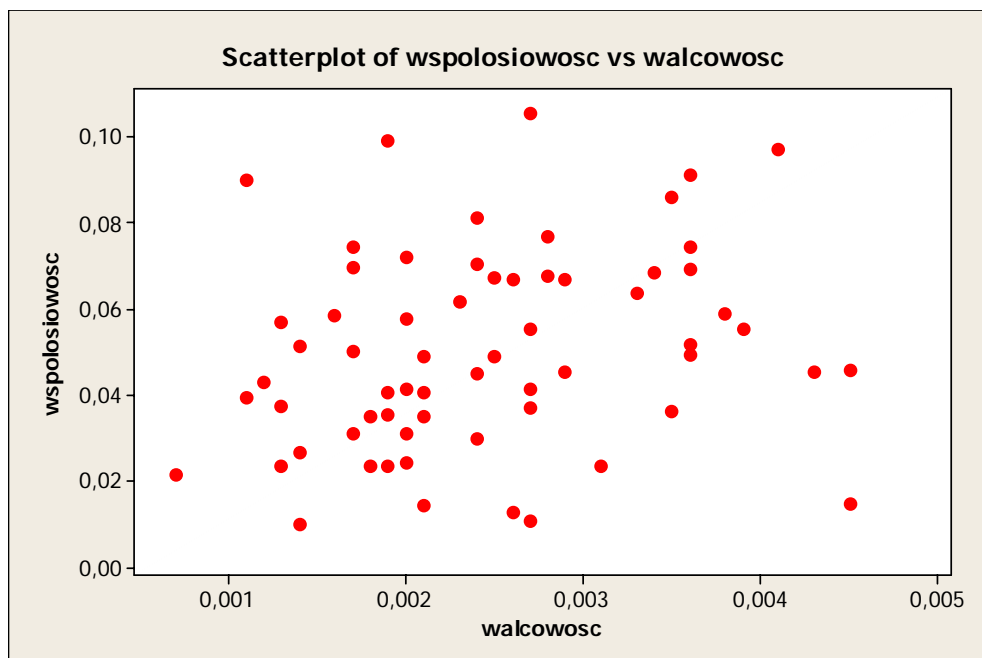
Jednak na podstawie wstępnej analizy uznano, że nie można wykluczyć czynników związanych z błędem prostopadłości jako potencjalnych przyczyn analizowanego błędu współosiowości otworów 1 i 2. Przyczyny te przeznaczono zatem do dalszej analizy.

Ponadto, zwrócono uwagę na widoczne na sporządzonych wykresach punkty „odstające”, które pojawiają się zarówno w odniesieniu do błędu prostopadłości, jak i współosiowości w wynikach pomiarów korpusów, które obrabiane były przy użyciu wrzeciona lewego. Może to wskazywać na potencjalne problemy związane z tym wrzecionem. Ewentualne badania potwierdzające taką hipotezę przewidziano jako możliwe do przeprowadzenia w ramach kolejnych podejmowanych w tym obszarze działań doskonalących.

4) Sprawdzenie zależności wartości błędu współosiowości otworów 1 i 2 oraz błędu walcowości otworu 1, z uwzględnieniem strumieni produkcji

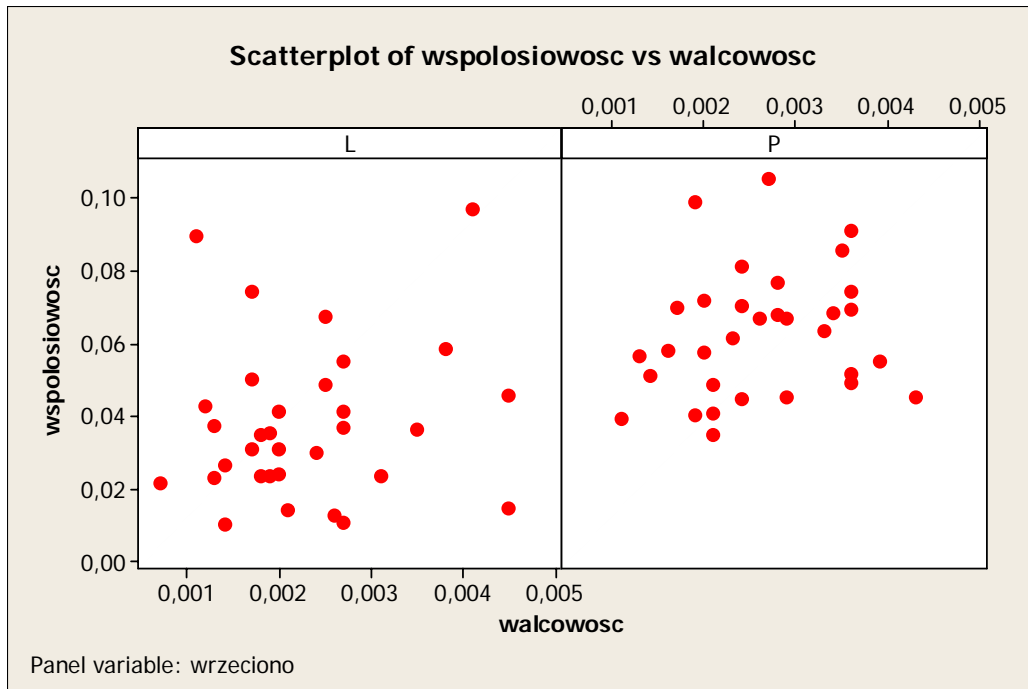
W celu sprawdzenia czy ewentualne niedokładności związane z niestabilnością wrzeciona mają związek z badanym błędem współosiowości otworów 1 i 2, przeprowadzono badanie zależności wartości tego błędu oraz błędu walcowości otworu 1.

Aby sprawdzić czy pomiędzy wartościami błędu współosiowości otworów 1 i 2 oraz błędem walcowości otworu 1 istnieje zależność, sporządzono odpowiednie wykresy rozproszenia – dla wszystkich danych (Rysunek 6.45), a także dla każdego z dwóch wrzecion (Rysunek 6.46) oraz dla każdego z czterech gniazd mocujących (Rysunek 6.47).



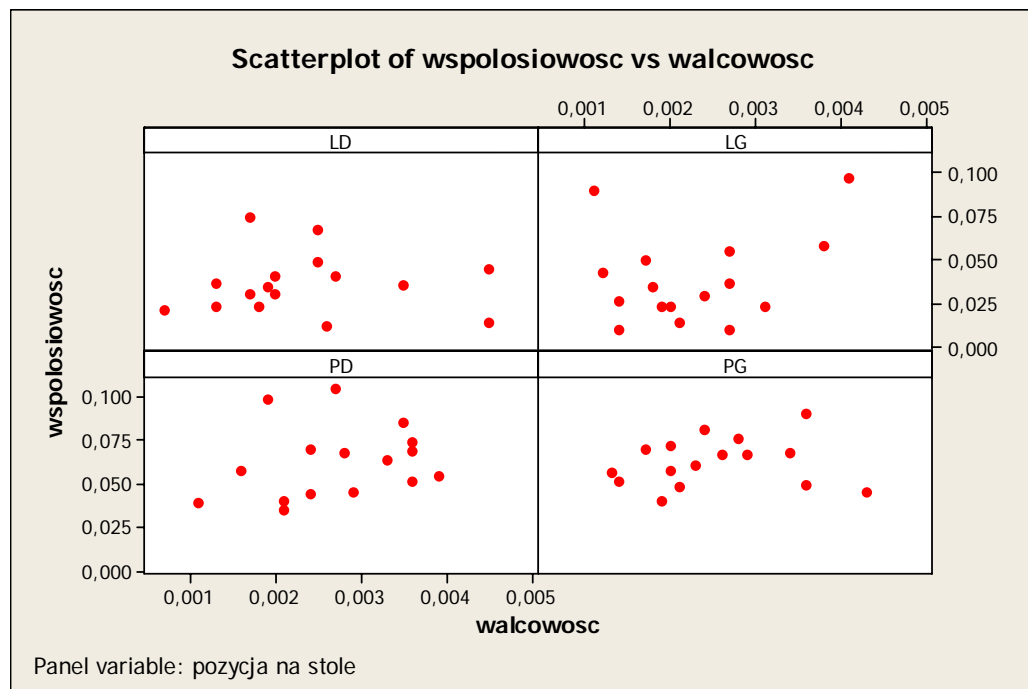
Rys.6.45. Wykres rozproszenia: odchyłki współosiowości otworów 1 i 2 oraz odchyłki walcowości otworu 1

Źródło: opracowanie własne



Rys.6.46. Wykres rozproszenia: odchyłki współosiowości otworów 1 i 2 oraz odchyłki walcowości otworu 1 – dla każdego z dwóch wrzecion (L – lewe, P – prawe)

Źródło: opracowanie własne

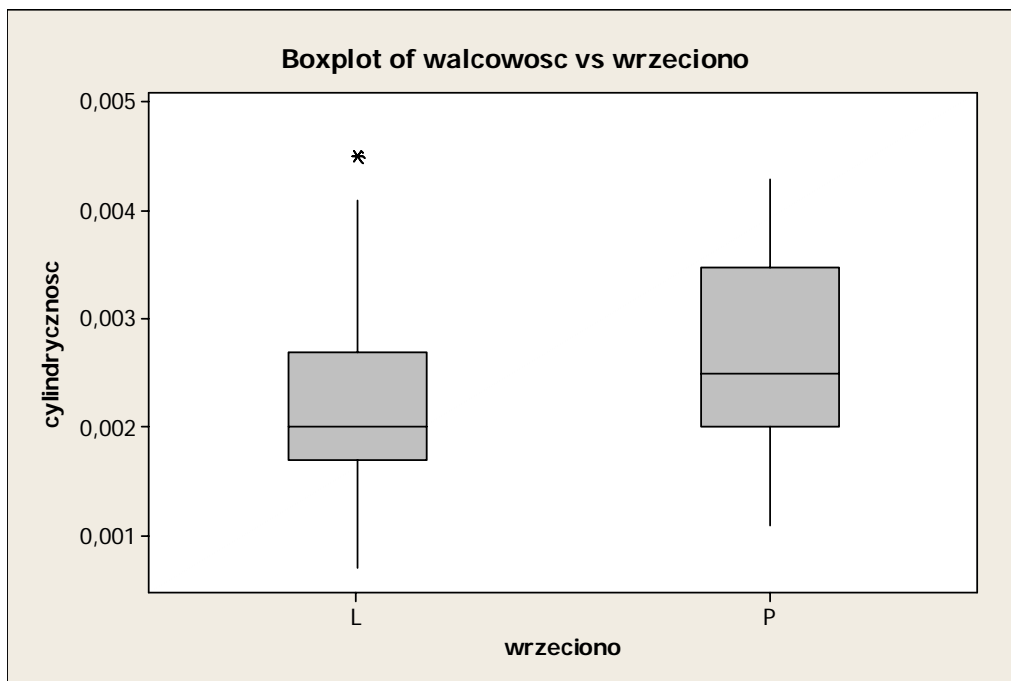


Rys.6.47. Wykres rozproszenia: odchyłki współosiowości otworów 1 i 2 oraz odchyłki walcowości otworu 1 – dla każdego z czterech gniazd mocujących

Źródło: opracowanie własne

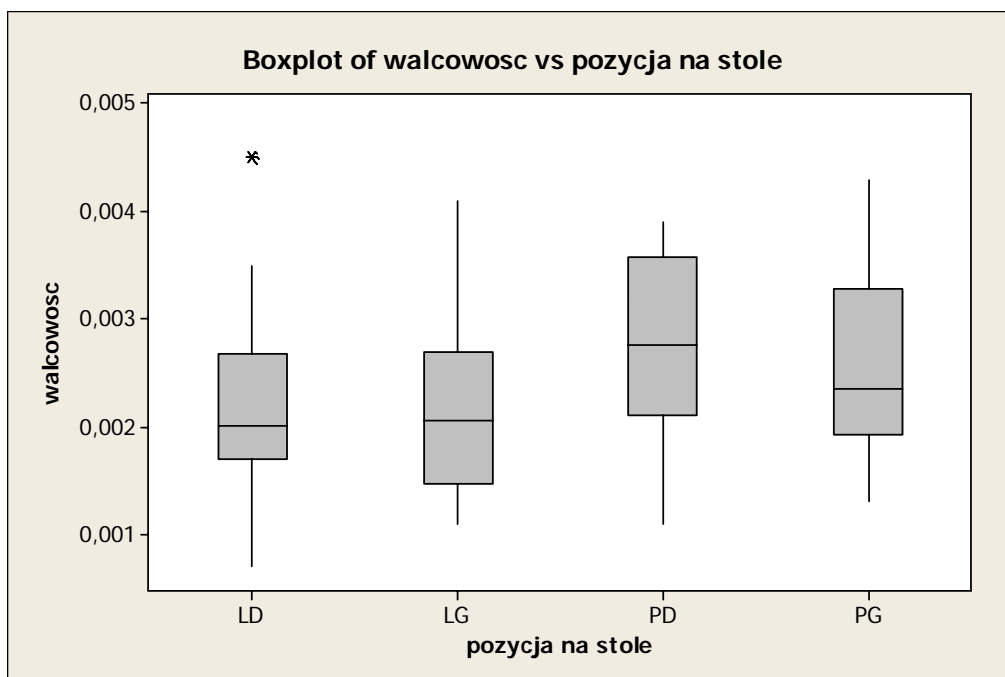
Ocena wzrokowa sporządzonych wykresów rozproszenia, obrazujących zależność wartości błędu współosiowości otworów 1 i 2 oraz błędu walcowości otworu 1, nie pozwoliła stwierdzić istnienia wyraźnej zależności liniowej pomiędzy zmiennymi.

Dodatkowo, aby sprawdzić, czy pomiędzy wartościami błędu walcowości powstającymi w ramach wyróżnionych strumieni produkcji, istnieją widoczne różnice, posłużono się wykresem pudełkowym, umożliwiającym porównanie stratyfikowanych danych (Rysunki 6.48 i 6.49).



Rys.6.48. Wykres pudełkowy: odchyłki walcowości otworu 1 – dla każdego z dwóch wrzecion (L – lewe, P – prawe)

Źródło: opracowanie własne



Rys.6.49. Wykres pudełkowy: odchyłki walcowości otworu 1 – dla każdego z czterech gniazd mocujących

Źródło: opracowanie własne

Porównanie (na podstawie oceny wzrokowej sporządzonych wykresów) wyników pomiarów błędu walcowości otworu 1, uzyskanych dla każdego z dwóch wrzecion, a także dla każdego z czterech gniazd mocujących, nie pozwoliło stwierdzić istnienia istotnej różnicy pomiędzy wynikami uzyskiwanymi średnio dla poszczególnych strumieni produkcji. Jednocześnie zauważono, że pomiędzy wartościami błędu walcowości otworu uzyskanymi dla każdego z wrzecion występują pewne różnice odnośnie rozproszenia zbiorów danych.

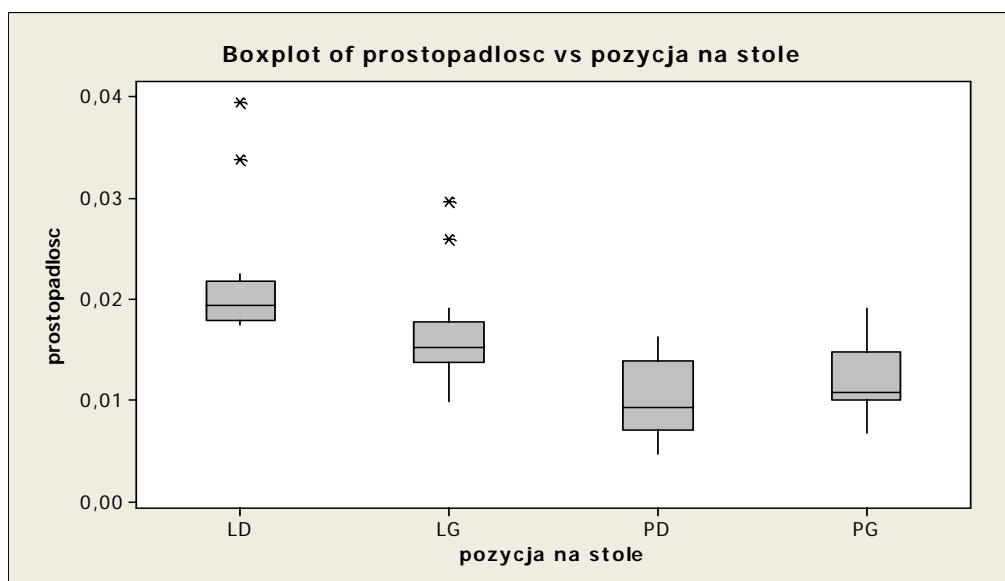
Ponieważ jednak sporządzone wykresy rozproszenia nie dały podstaw do założenia, że istnieje wyraźna zależność pomiędzy wartościami powstającego błędu współosiowości otworów 1 i 2, a błędem walcowości otworu 1, zatem uznano że nie ma wystarczających dowodów, aby stwierdzić że czynniki związane z niestabilnością wrzeciona są bezpośrednią przyczyną powstawania błędu współosiowości otworów 1 i 2. Przyczyny te wykluczono z dalszych badań.

5) Sprawdzenie zależności wartości błędu współosiowości otworów 1 i 2 oraz błędu prostopadłości otworu 1 do powierzchni czołowej korpusu 4, dla każdego z gniazd mocujących

Aby sprawdzić czy ewentualna niepłaskość stołu, na którym mocowane są wyroby podczas obróbki, wpływa na powstający błąd współosiowości otworów 1 i 2, zbadano:

- a) czy pomiędzy wartościami błędu prostopadłości otworu 1 do powierzchni czołowej korpusu 4, uzyskiwanymi w korpusach obrabianych w poszczególnych gniazdach mocujących istnieją wyraźne różnice,
- b) czy istnieje zależność pomiędzy błędem prostopadłości otworu 1 do powierzchni czołowej korpusu 4 a błędem współosiowości otworów 1 i 2, w ramach poszczególnych gniazd mocujących.

5a) Aby sprawdzić, czy pomiędzy wartościami błędu prostopadłości otworu 1 do powierzchni czołowej korpusu 4, uzyskiwanymi w korpusach obrabianych w poszczególnych gniazdach mocujących istnieją wyraźne różnice, posłużono się wykresem pudełkowym, umożliwiającymi porównanie stratyfikowanych danych (Rysunek 6.50).

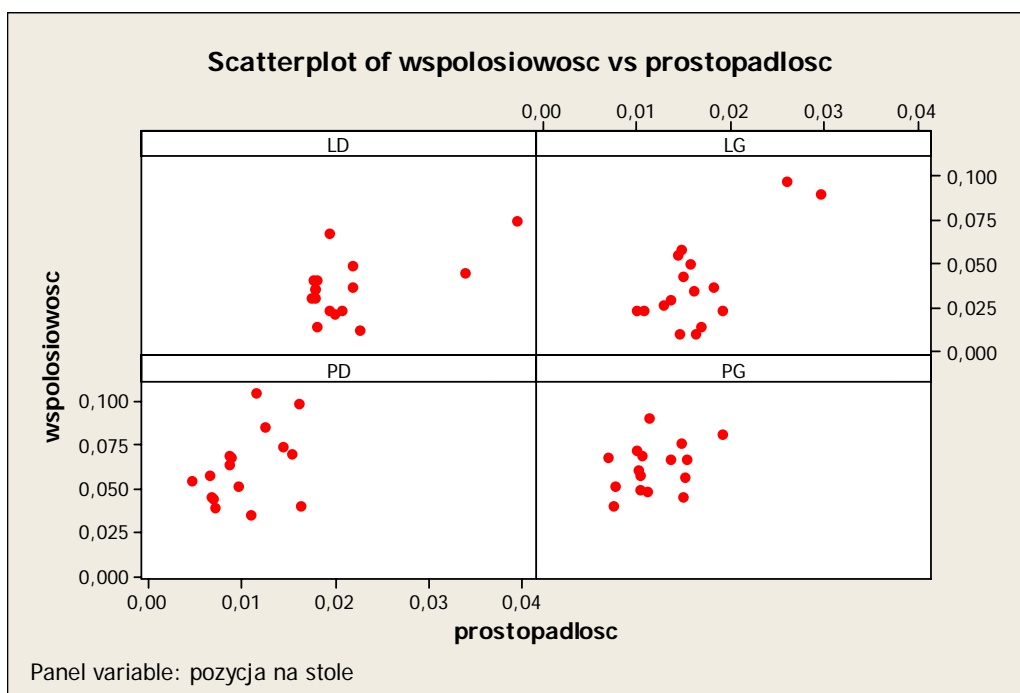


Rys.6.50. Wykres pudełkowy: odchyłki prostopadłości otworu 1 do powierzchni czołowej korpusu 4 – dla każdego z czterech gniazd mocujących

Źródło: opracowanie własne

Porównanie (na podstawie oceny wzrokowej sporządzonych wykresów) wyników pomiarów uzyskanych dla każdego z czterech gniazd mocujących, pozwoliło stwierdzić, że możliwe jest istnienie znaczących różnic pomiędzy wartościami błędu prostopadłości otworu 1 do powierzchni czołowej korpusu 4 uzyskiwanymi w wyrobach obrabianych w poszczególnych gniazdach – szczególnie wyraźne różnice dostrzeżono pomiędzy gniazdami prawymi, a każdym z gniazd lewych. Taki rezultat może świadczyć o występowaniu błędu płaskości stołu obrabiarki.

5b) Aby sprawdzić czy istnieje zależność pomiędzy błędem prostopadłości otworu 1 do powierzchni czołowej korpusu 4 a błędem współosiowości otworów 1 i 2, w ramach poszczególnych gniazd mocujących, sporządzono odpowiednie wykresy rozproszenia – dla każdego z czterech gniazd mocujących (Rysunek 6.51).



Rys.6.51. Wykres rozproszenia: odchyłki współosiowości otworów 1 i 2 oraz odchyłki prostopadłości otworu 1 do powierzchni czołowej korpusu 4 – dla każdego z czterech gniazd mocujących

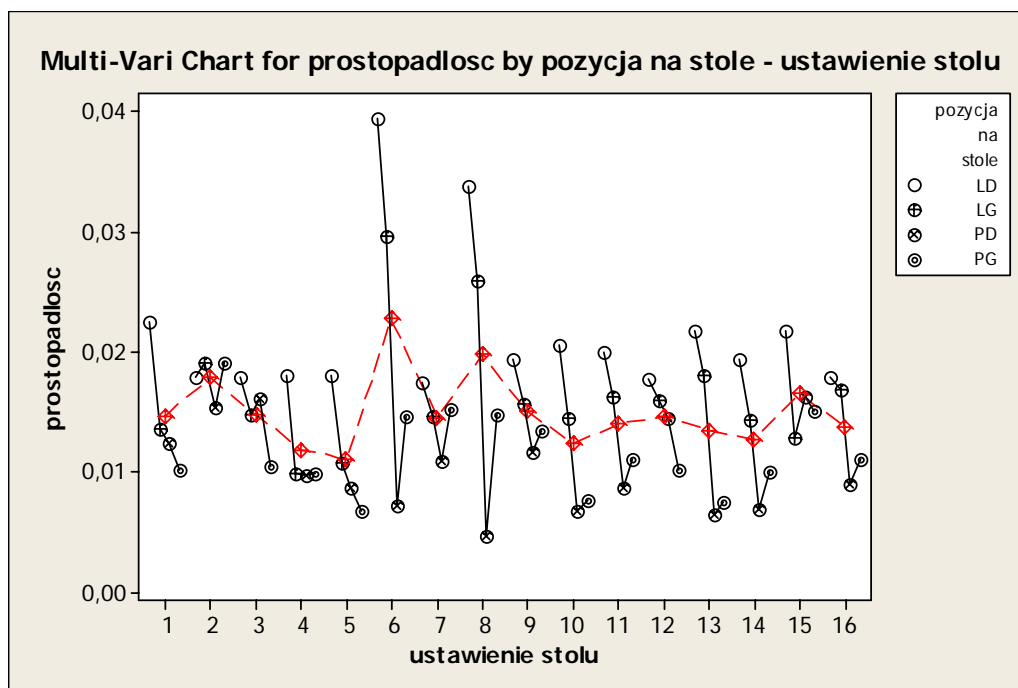
Źródło: opracowanie własne

Ocena wzrokowa sporządzonych wykresów rozproszenia pozwala przypuszczać, że pomiędzy wartościami błędu współosiowości otworów 1 i 2 oraz wartościami błędu prostopadłości otworu 1 do powierzchni czołowej korpusu 4, w ramach poszczególnych gniazd mocujących, może zachodzić pewna (umiarkowana) zależność. Podobnie jak w przypadku zależności w ramach wrzecion (Rys. 6.42), w głównej mierze wydaje się być ona spowodowana punktami „odstającymi”, o wysokich wartościach błędu prostopadłości i współosiowości.

W wyniku przeprowadzonej wstępnej analizy, stwierdzono że nie można wykluczyć występowania błędu płaskości stołu obrabiarki, na którym mocowane są wyroby podczas obróbki, a także jej wpływu na powstający błąd współosiowości. Przyczynę tę przeznaczono do dalszych badań.

6) Sprawdzenie czy zmienność wartości błędu prostopadłości otworu 1 do powierzchni czołowej korpusu 4, pomiędzy poszczególnymi ustawieniami stołu jest większa niż przeciętna zmienność wartości tego błędu w ramach jednego ustawienia stołu

Aby zbadać czy zachodzi sytuacja, w której istnieje znacząca niedokładność ustalenia położenia stołu przy obrocie, sprawdzono czy zmienność wartości błędu prostopadłości otworu 1 do powierzchni czołowej korpusu 4, pomiędzy poszczególnymi ustawieniami stołu jest większa niż przeciętna zmienność wartości tego błędu w ramach jednego ustawienia stołu. W tym celu posłużono się wykresem Multi-vari (Rysunek 6.52).



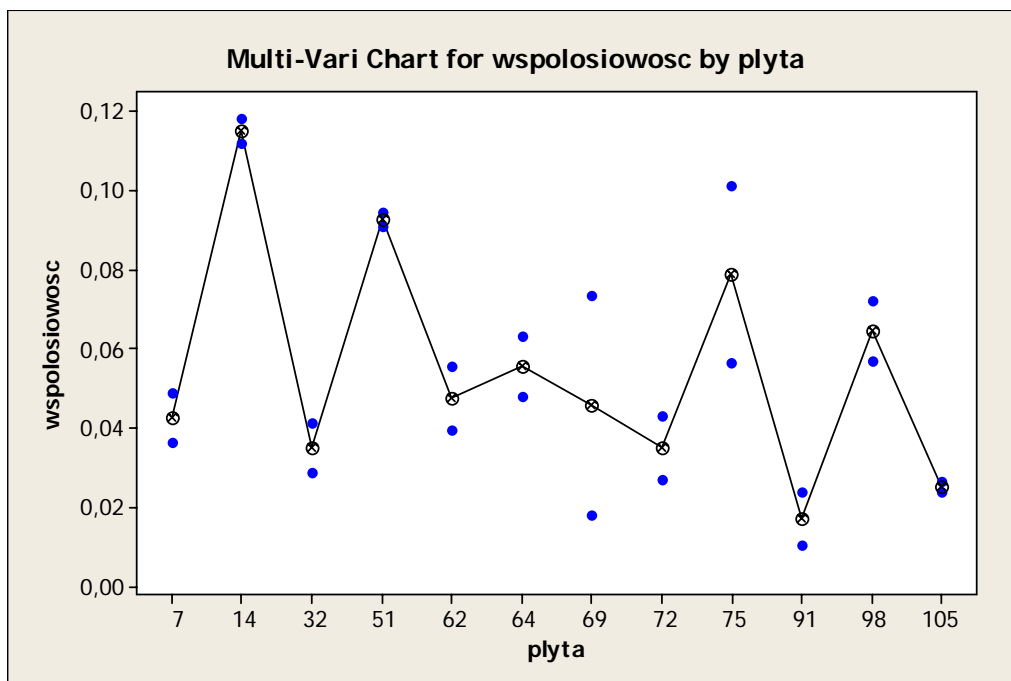
Rys.6.52. Wykres Multi-vari: odchyłki prostopadłości otworu 1 do powierzchni czołowej korpusu 4, uzyskiwane w każdym kolejnym ustawieniu stołu, z rozróżnieniem czterech gniazd mocujących

Źródło: opracowanie własne

Na podstawie oceny wzrokowej sporządzonego wykresu stwierdzono, że zebrane dane nie przedstawiają wystarczających dowodów, aby stwierdzić, że błąd ustawienia stołu wnosi do błędu prostopadłości otworu 1 do powierzchni czołowej korpusu 4 istotnie większą zmienność od zmienności wartości tego błędu w ramach każdego z poszczególnych ustawień stołu. Na tej podstawie, przyczynę tę wykluczono z dalszych badań.

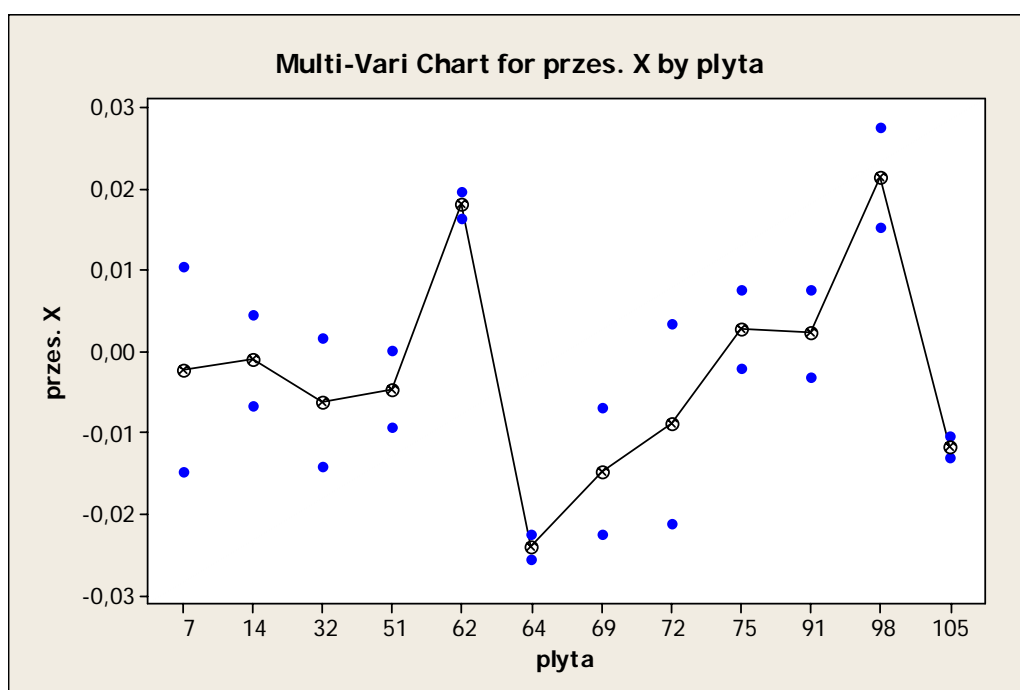
7) Sprawdzenie wpływu płyt mocujących na wartości błędu współosiowości otworów 1 i 2

Na ewentualne błędy zamocowania przedmiotu składa się kilka czynników. Za jeden z kluczowych w tym wypadku uznano wpływ stosowanych w analizowanym procesie płyt mocujących. Aby sprawdzić wpływ płyt mocujących na wartości powstającego błędu współosiowości otworów 1 i 2, z przeprowadzonych pomiarów postarano się wyeliminować w miarę możliwości ewentualny wpływ innych potencjalnie istotnych czynników. Dla płyt mocujących, które były stosowane więcej niż jeden raz podczas tej samej serii pomiarów w tym samym gnieździe, porównano wyniki pomiaru odchyłki współosiowości otworów 1 i 2, a także mierzone wartości przesunięcia osi otworu 1 względem osi otworu 2, w osi X i w osi Y. Dane te przedstawiono w postaci wykresów Multi-vari (Rysunki 6.53 – 6.55).



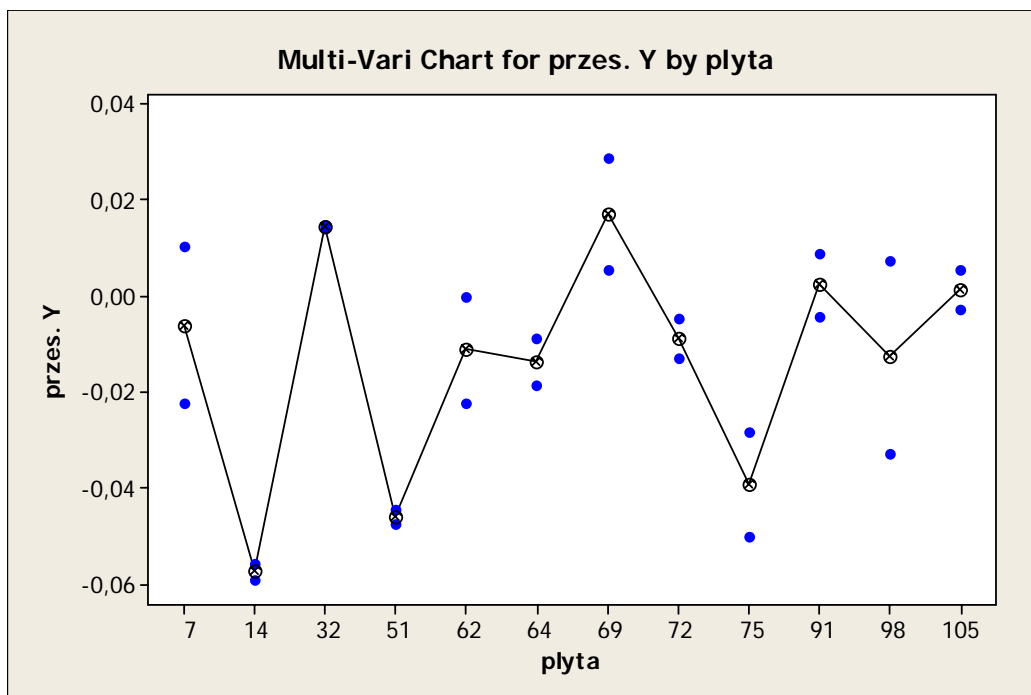
Rys.6.53. Wykres Multi-vari: odchyłki współosiowości otworów 1 i 2, uzyskiwane w wyrobach mocowanych na poszczególnych płytach mocujących (w tym samym gnieździe, w tej samej serii pomiarów)

Źródło: opracowanie własne



Rys.6.54. Wykres Multi-vari: wartości przesunięcia osi otworu 1 względem osi otworu 2, w osi X, uzyskiwane w wyrobach mocowanych na poszczególnych płytach mocujących (w tym samym gnieździe, w tej samej serii pomiarów)

Źródło: opracowanie własne



Rys.6.55. Wykres Multi-vari: wartości przesunięcia osi otworu 1 względem osi otworu 2, w osi Y , uzyskiwane w wyrobach mocowanych na poszczególnych płytach mocujących (w tym samym gnieździe, w tej samej serii pomiarów)

Źródło: opracowanie własne

Na podstawie oceny wzrokowej sporządzonych wykresów (Rys. 6.53-6.55) stwierdzono, że zmienność wnoszona przez poszczególne płyty mocujące jest średnio większa od zmienności wartości błędu współosiowości otworów 1 i 2, uzyskiwanych przy stosowaniu jednej płyty mocującej (mocowanej w tym samym gnieździe). Aby uzyskać pewność, czy taka hipoteza może zostać potwierdzona, należałoby przeprowadzić szerokie badanie w odniesieniu do czynnika, jakim są stosowane w analizowanym procesie płyty mocujące.

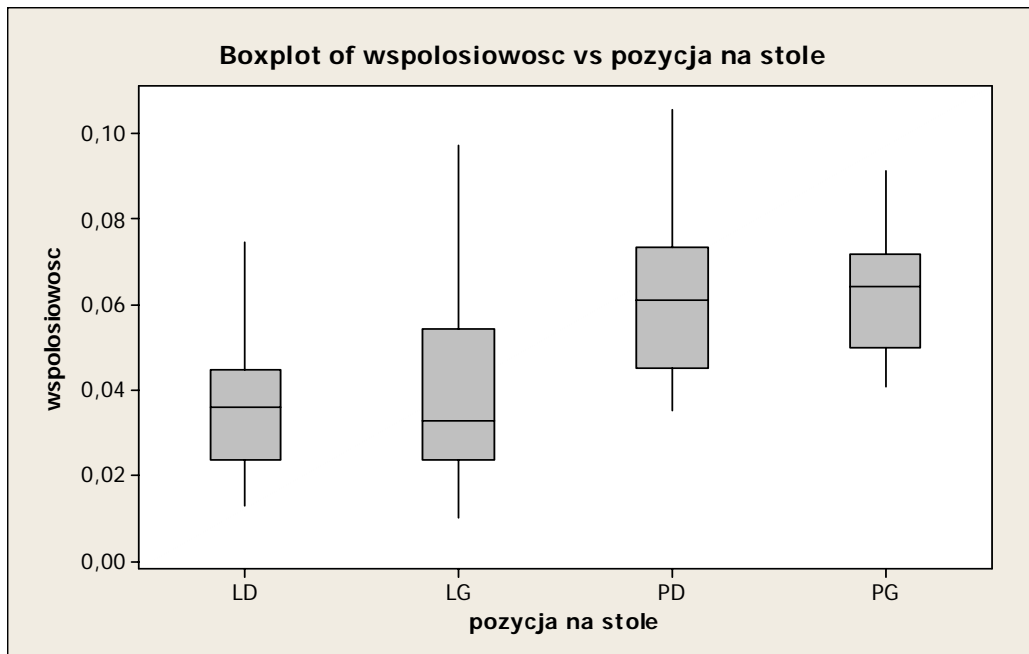
Z uwagi na to, że w operacji 40 stosuje się obecnie 94 płyty mocujące (dopuszczalna wartość błędu wymiaru dla każdej z nich wynosi 0,005 [mm]), ze względów ekonomicznych badania takiego na razie nie zaplanowano. W przedsiębiorstwie nie planuje się w obecnym czasie zakupu nowych płyt mocujących, jednak wiedza o potencjalnej istotności dokładności płyt mocujących jako czynnika prawdopodobnie wpływającego na zmienność analizowanego procesu, jest bardzo cenna dla przedsiębiorstwa i najprawdopodobniej zostanie wykorzystana w przyszłości.

8) Sprawdzenie czy wartości błędu współosiowości otworów 1 i 2 istotnie różnią się pomiędzy poszczególnymi gniazdami mocującymi

Aby sprawdzić czy ewentualna niedokładność nastawienia obrabiarki ma wpływ na powstający błąd współosiowości, zbadano:

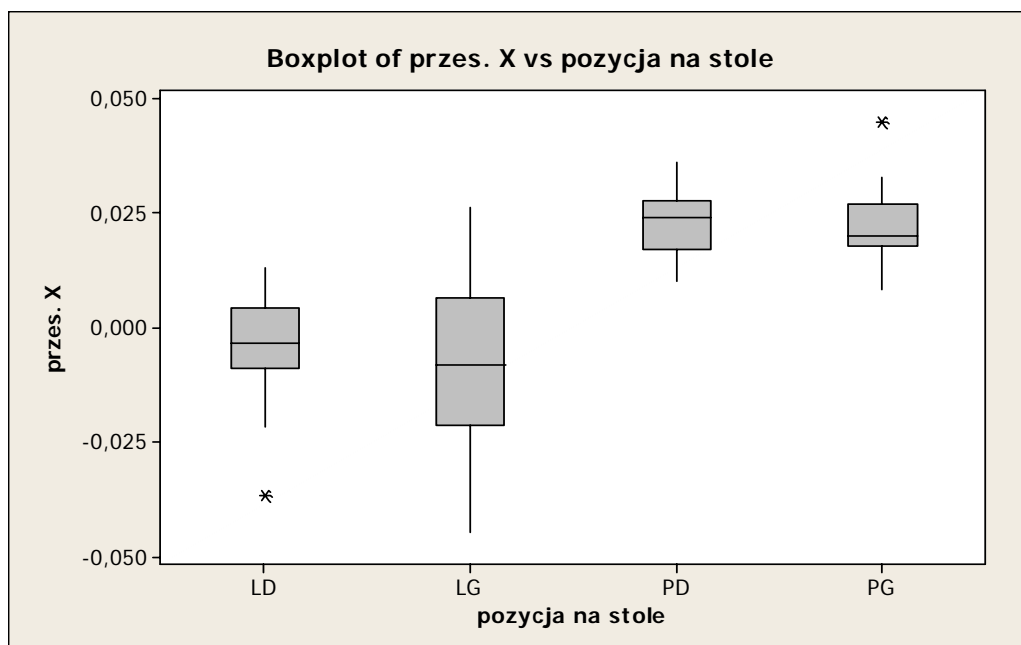
- czy pomiędzy wartościami błędu współosiowości otworów 1 i 2 uzyskiwanymi w wyrobach obrabianych w poszczególnych gniazdach mocujących istnieją wyraźne różnice,
- czy ewentualne różnice pomiędzy wartościami błędu współosiowości otworów 1 i 2 uzyskiwanymi w wyrobach obrabianych w poszczególnych gniazdach mocujących są stałe w ramach poszczególnych ustawień stołu.

8a) Aby sprawdzić, czy pomiędzy wartościami błędu współosiowości otworów 1 i 2 uzyskiwanymi w wyrobach obrabianych w poszczególnych gniazdach istnieją wyraźne różnice, posłużono się wykresem pudełkowym, umożliwiającym porównanie stratyfikowanych danych (Rysunek 6.56). Takie wykresy sporządzono także dla mierzonego przesunięcia osi otworu 1 względem osi otworu 2 w osi X (Rysunek 6.57) i w osi Y (Rysunek 6.58).



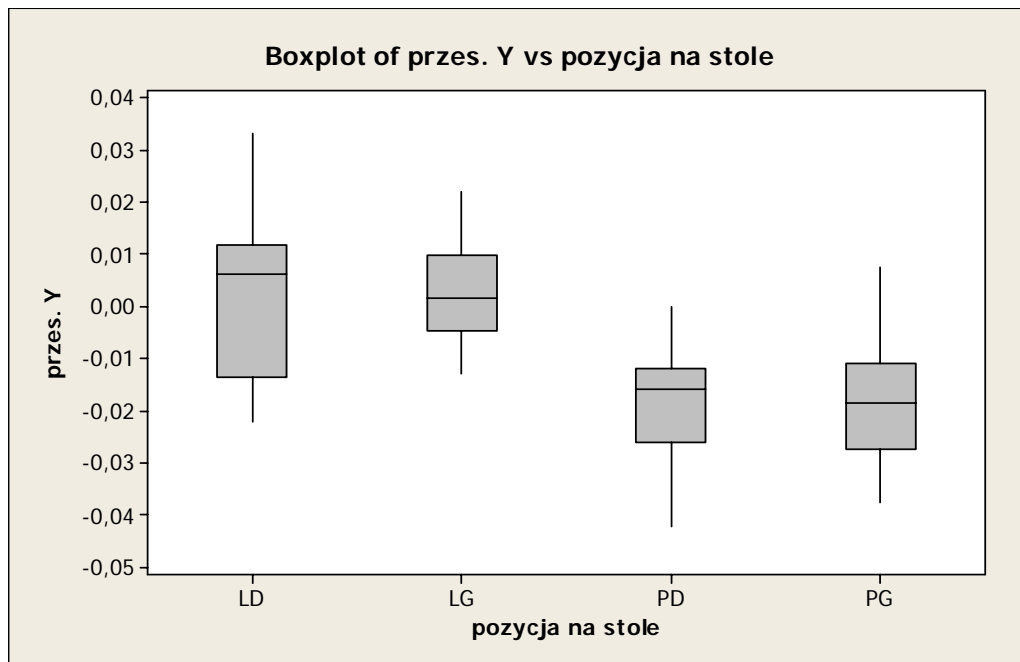
Rys.6.56. Wykres pudełkowy: odchyłki współosiowości otworów 1 i 2 – dla każdego z czterech gniazd mocujących

Źródło: opracowanie własne



Rys.6.57. Wykres pudełkowy: wartości przesunięcia osi otworu 1 względem osi otworu 2, w osi X – dla każdego z czterech gniazd mocujących

Źródło: opracowanie własne

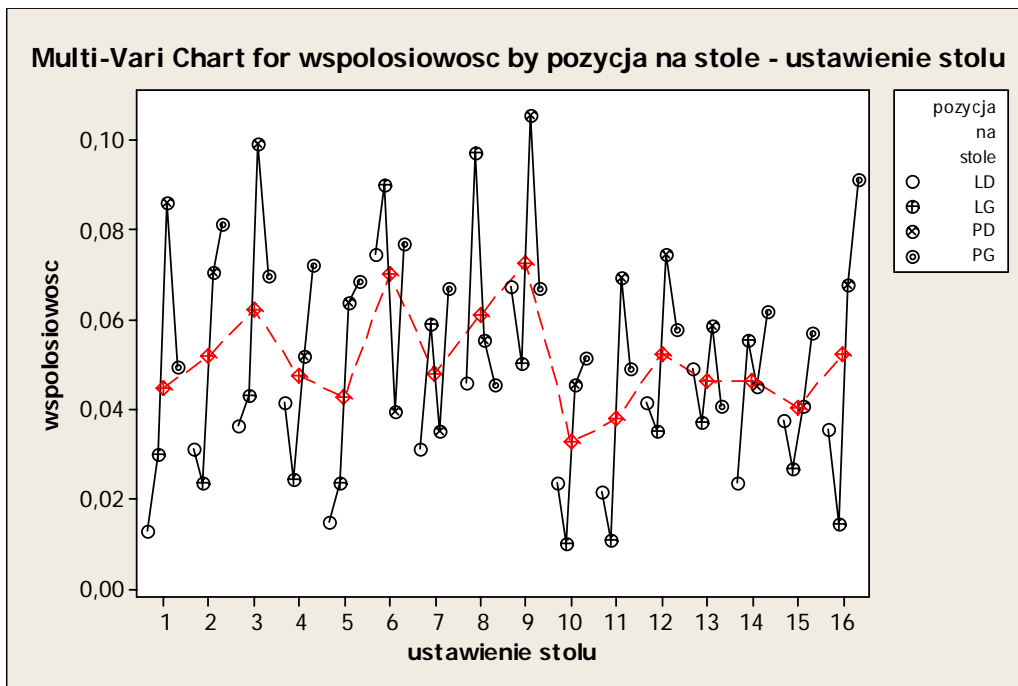


Rys.6.58. Wykres pudełkowy: wartości przesunięcia osi otworu 1 względem osi otworu 2, w osi Y – dla każdego z czterech gniazd mocujących

Źródło: opracowanie własne

W wyniku oceny wzrokowej sporządzonych wykresów stwierdzono, że możliwe jest istnienie znaczących różnic pomiędzy wartościami błędu współosiowości otworów 1 i 2, a także wartościami przesunięcia osi otworu 1 względem osi otworu 2, w osi X i w osi Y, powstającymi w wyrobach obrabianych w poszczególnych gniazdach – szczególnie wyraźne różnice dostrzeżono pomiędzy gniazdami prawymi, a gniazdami lewymi.

8b) Aby sprawdzić czy ewentualne różnice pomiędzy wartościami błędu współosiowości otworów 1 i 2, uzyskiwanymi w wyrobach obrabianych w poszczególnych gniazdach mocujących, są stałe w ramach poszczególnych ustawień stołu, posłużono się wykresem Multi-vari (Rysunek 6.59).



Rys.6.59. Wykres Multi-vari: odchyłki współosiowości otworów 1 i 2, uzyskiwane w każdym kolejnym ustawieniu stołu, z rozróżnieniem czterech gniazd mocujących

Źródło: opracowanie własne

Na podstawie oceny wzrokowej sporządzonego wykresu stwierdzono, że można założyć, iż wielkości różnic pomiędzy wartościami błędu współosiowości otworów 1 i 2, uzyskiwanymi w wyrobach obrabianych w poszczególnych gniazdach mocujących, są podobnego rzędu w każdym ustawieniu stołu. Ponadto, stwierdzono że zmienność pomiędzy wartościami błędu współosiowości otworów 1 i 2 dla poszczególnych gniazd mocujących przekracza średnią zmienność pomiędzy poszczególnymi ustawieniami stołu obrabiarki.

W wyniku wstępnej analizy, stwierdzono zatem, że niedokładności nastawienia obrabiarki nie można wykluczyć jako prawdopodobnej przyczyny powstającego błędu współosiowości otworów 1 i 2. Aby potwierdzić przypuszczenia, przyczynę tą przeznaczono do dalszej analizy.

Czy zidentyfikowano prawdopodobne przyczyny?

W wyniku przeprowadzonej wstępnej analizy, część potencjalnych przyczyn analizowanego problemu została odrzucona. Pozostałe czynniki uznano za prawdopodobne przyczyny powstającego błędu obróbki i (większość z nich) przeznaczono do dalszej analizy. Przyczyny te, wraz z proponowanymi sposobami dalszego sprawdzenia ich wpływu na badaną cechę wyrobu, zebrano w Tabeli 6.10.

Tabela 6.10. Zestawienie prawdopodobnych przyczyn i zaplanowanych dalszych sposobów sprawdzenia ich wpływu na powstawanie błędu współosiowości otworów 1 i 2

Prawdopodobna przyczyna	Sposób sprawdzenia
Błędy realizacji ruchów posuwowych	Sprawdzenie zależności wartości błędu współosiowości otworów 1 i 2 oraz błędu współosiowości otworów 1 i 3 (stanowiącego miarę powtarzalności pozycjonowania obrabiarki), z uwzględnieniem strumieni produkcji – sprawdzenie siły ewentualnej zależności oraz istotności różnic pomiędzy strumieniami produkcji
Nieprostokątność wrzeciona do powierzchni stołu	Sprawdzenie zależności wartości błędu współosiowości otworów 1 i 2 oraz błędu prostokątności otworu 1 do powierzchni czołowej korpusu 4, dla każdego z wrzecion – sprawdzenie siły ewentualnej zależności oraz istotności różnic pomiędzy strumieniami produkcji
Odchylenie osi wiertła od prostokątności względem stołu	
Błędy prostoliniowości prowadnic	
Nieprostoliniowość ruchu wrzeciona / narzędzia	
Nieprostokątność ruchu wrzeciona do powierzchni stołu	
Niepłaskość powierzchni stołu	Sprawdzenie zależności wartości błędu współosiowości otworów 1 i 2 oraz błędu prostokątności otworu 1 do powierzchni czołowej korpusu 4, dla każdego z gniazd mocujących – sprawdzenie siły ewentualnej zależności oraz istotności różnic pomiędzy gniazdami mocującymi
Niedokładność nastawienia obrabiarki	Sprawdzenie czy wartości błędu współosiowości otworów 1 i 2 istotnie różnią się pomiędzy poszczególnymi gniazdami mocującymi – także w odniesieniu do wartości przesunięcia osi otworu 1 względem osi otworu 2 w osi x i w osi y

Źródło: opracowanie własne

6.3.6. Dalsza analiza prawdopodobnych przyczyn

Do dalszej analizy przeznaczono kilka prawdopodobnych przyczyn powstawania błędu współosiowości otworów 1 i 2. Zgodnie z algorytmem opracowanej metodyki, w takiej sytuacji wskazane byłoby przeprowadzenie statystycznie zaplanowanego eksperymentu (DoE), co pozwoliłoby na dokładniejsze przeanalizowanie wpływu wytypowanych czynników na mierzoną charakterystykę wyjściową procesu. Przeprowadzenie takiego eksperymentu wymaga jednak ingerencji w tok procesu, co w danym czasie nie było możliwe w badanym procesie. Dlatego, zgodnie z zadanym algorytmem postępowania, do dalszej analizy wykorzystano inne metody i narzędzia.

Sprawdzenia, jakie miały być dokonane w tym etapie, podzielono na dwie główne grupy:

- a) badanie siły i statystycznej istotności ewentualnych zależności pomiędzy zmiennymi,
 - b) badanie czy pomiędzy średnimi wartościami mierzonych cech wyrobu w ramach poszczególnych strumieni produkcji występują statystycznie istotne różnice.
- a) W celu sprawdzenia siły i statystycznej istotności ewentualnej zależności pomiędzy:
- wartościami błędu współosiowości otworów 1 i 2 oraz błędów współosiowości otworów 1 i 3,
 - wartościami błędów współosiowości otworów 1 i 2 oraz błędów prostokątności otworu 1 do powierzchni czołowej korpusu 4,

przeprowadzono analizę korelacji, obliczając współczynnik korelacji liniowej Pearsona r , oraz odpowiadającą mu wartość p (p -value). Wyniki tych obliczeń przedstawiono w Tabeli 6.11.

Tabela 6.11. Wyniki analizy korelacji dla badanych zależności pomiędzy zmiennymi

Badana zależność	Analizowany strumień produkcji						
	wszystkie dane	wrzeciono lewe	wrzeciono prawe	gniazdo LD	gniazdo LG	gniazdo PG	gniazdo PD
wartościami błędu współosiowości otworów 1 i 2 oraz błędu współosiowości otworów 1 i 3	$r = -0,110$ $p = 0,387$	$r = 0,409$ $p = 0,020$	$r = -0,173$ $p = 0,343$	$r = 0,104$ $p = 0,702$	$r = 0,525$ $p = 0,037$	$r = -0,197$ $p = 0,464$	$r = -0,162$ $p = 0,548$
wartościami błędu współosiowości otworów 1 i 2 oraz błędu współosiowości otworów 1 i 3 – po usunięciu punktów „odstających” (2)	-	$r = 0,237$ $p = 0,206$ (bez 2 punktów)	-	-	$r = 0,297$ $p = 0,302$ (bez 2 punktów)	-	-
wartościami błędu współosiowości otworów 1 i 2 oraz błędu prostopadłości otworu 1 do powierzchni czołowej korpusu 4	$r = -0,030$ $p = 0,817$	$r = 0,524$ $p = 0,002$	$r = 0,379$ $p = 0,032$	$r = 0,537$ $p = 0,032$	$r = 0,716$ $p = 0,002$	$r = 0,338$ $p = 0,201$	$r = 0,424$ $p = 0,102$
wartościami błędu współosiowości otworów 1 i 2 oraz błędu prostopadłości otworu 1 do powierzchni czołowej korpusu 4 – po usunięciu punktów „odstających” (1-3)	-	$r = 0,132$ $p = 0,493$ (bez 3 punktów)	$r = 0,250$ $p = 0,190$ (bez 3 punktów)	$r = 0,157$ $p = 0,576$ (bez 1 punktu)	$r = 0,022$ $p = 0,941$ (bez 2 punktów)	-	-

Źródło: opracowanie własne

Wyniki przeprowadzonej analizy korelacji wskazały na istnienie słabych i umiarkowanych zależności liniowych (wartości współczynnika korelacji liniowej Pearsona $r > 0,3$, przy wartości $p < 0,05$) pomiędzy wartościami błędu współosiowości otworów 1 i 2 oraz błędu współosiowości otworów 1 i 3, a także pomiędzy wartościami błędu współosiowości otworów 1 i 2 oraz błędu prostopadłości otworu 1 do powierzchni czołowej korpusu 4 – przede wszystkim w odniesieniu do wrzeciona lewego.

Z uwagi na fakt, że na etapie wstępnej analizy, na wykresach rozproszenia obrazujących zależność błędu współosiowości otworów 1 i 2 oraz błędu współosiowości otworów 1 i 3, a także zależność błędu współosiowości otworów 1 i 2 oraz błędu prostopadłości otworu 1 do powierzchni czołowej korpusu 4, zauważono tzw. punkty „odstające”, przeprowadzono sprawdzenie tych punktów. W efekcie zidentyfikowano w posiadanym zbiorze danych trzy punkty, charakteryzujące się największymi wartościami błędu współosiowości otworów 1 i 2, które występowały na wspomnianych wykresach w charakterze punktów „odstających”. Ponieważ przypuszczano, że obecność tych punktów w istotny sposób wpływa na wyniki analizy korelacji, usunięto z badanych zbiorów danych punkty „odstające” i ponownie przeprowadzono analizę korelacji. Wyniki okazały się

potwierdzać przypuszczenia – po usunięciu maksymalnie trzech punktów ze zbioru danych (odpowiadających najwyższym wartościom błędów współosiowości otworów 1 i 2), pomiędzy żadnymi z badanych zmiennych nie zaobserwowano istotnej statystycznie zależności liniowej (patrz Tab.6.11).

W takiej sytuacji, aby stwierdzić czy wstępnie zidentyfikowane zależności pomiędzy badanymi zmiennymi w rzeczywistości zachodzą, należałoby przeprowadzić dalsze badania, w oparciu o nowe pomiary odpowiednich charakterystyk procesu.

b) W celu sprawdzenia czy pomiędzy wartościami:

- błędów współosiowości otworów 1 i 3,
- błędów prostopadłości otworu 1 do powierzchni czołowej korpusu 4,
- błędów współosiowości otworów 1 i 2,
- przesunięcia osi otworu 1 względem osi otworu 2, w osi x,
- przesunięcia osi otworu 1 względem osi otworu 2, w osi y,

osiąganych średnio dla poszczególnych strumieni produkcji, występują istotne statystycznie różnice, przeprowadzono badanie, polegające na porównaniu median dla odpowiednich zbiorów danych. Do tego celu, zgodnie z algorytmem zawartym w metodyce, zastosowano test Mood'a (ang. *Mood's median test*). Wyniki tych obliczeń przedstawiono w Tabeli 6.12.

Tabela 6.12. Wyniki porównania median dla badanych zmiennych, w odniesieniu do poszczególnych strumieni produkcji

Badana cecha	Porównywane strumienie produkcji						
	wrzciono lewe i wrzciono prawe	gniazdo LD i gniazdo LG	gniazdo PG i gniazdo PD	gniazdo LG i gniazdo PD	gniazdo LD i gniazdo PG	gniazdo LD i gniazdo PD	gniazdo LG i gniazdo PG
wartości błędów współosiowości otworów 1 i 3	$\chi^2 = 12,25$ $p = 0,000$	$\chi^2 = 0,50$ $p = 0,480$	$\chi^2 = 0,00$ $p = 1,000$	$\chi^2 = 0,50$ $p = 0,480$	$\chi^2 = 12,50$ $p = 0,000$	$\chi^2 = 8,00$ $p = 0,005$	$\chi^2 = 0,50$ $p = 0,480$
wartości błędów prostopadłości otworu 1 do powierzchni czołowej korpusu 4	$\chi^2 = 20,25$ $p = 0,000$	$\chi^2 = 8,00$ $p = 0,005$	$\chi^2 = 0,50$ $p = 0,480$	$\chi^2 = 8,00$ $p = 0,005$	$\chi^2 = 24,50$ $p = 0,000$	$\chi^2 = 32,00$ $p = 0,000$	$\chi^2 = 4,50$ $p = 0,034$
wartości błędów współosiowości otworów 1 i 2	$\chi^2 = 18,08$ $p = 0,000$	$\chi^2 = 0,50$ $p = 0,480$	$\chi^2 = 0,00$ $p = 1,000$	$\chi^2 = 4,50$ $p = 0,034$	$\chi^2 = 15,18$ $p = 0,000$	$\chi^2 = 8,00$ $p = 0,005$	$\chi^2 = 8,00$ $p = 0,005$
wartości przesunięcia osi otworu 1 względem osi otworu 2 w osi x	$\chi^2 = 42,25$ $p = 0,000$	$\chi^2 = 0,50$ $p = 0,480$	$\chi^2 = 0,50$ $p = 0,480$	$\chi^2 = 18,00$ $p = 0,000$	$\chi^2 = 24,50$ $p = 0,000$	$\chi^2 = 24,50$ $p = 0,000$	$\chi^2 = 18,00$ $p = 0,000$
wartości przesunięcia osi otworu 1 względem osi otworu 2 w osi y	$\chi^2 = 25,00$ $p = 0,000$	$\chi^2 = 0,50$ $p = 0,480$	$\chi^2 = 0,50$ $p = 0,480$	$\chi^2 = 18,00$ $p = 0,000$	$\chi^2 = 8,00$ $p = 0,005$	$\chi^2 = 8,00$ $p = 0,005$	$\chi^2 = 18,00$ $p = 0,000$

Źródło: opracowanie własne

Na podstawie przeprowadzonych obliczeń stwierdzono istotne statystycznie różnice pomiędzy medianami poszczególnych strumieni produkcji, dla wszystkich badanych cech (wartość $p < 0,05$, przy wysokiej wartości χ^2). Jedynie pomiędzy dwoma gniazdami lewymi i dwoma gniazdami prawymi występuje brak istotnych różnic w odniesieniu do większości mierzonych charakterystyk wyjściowych.

Czy zidentyfikowano najbardziej prawdopodobne przyczyny?

Przeprowadzona dalsza analiza prawdopodobnych przyczyn występowania badanego błędu obróbki nie dostarczyła wystarczających dowodów, aby stwierdzić występowanie istotnej statystycznie zależności pomiędzy badanymi cechami. Wobec tego, jedyną prawdopodobną przyczyną problemu, dla której zaplanowane sprawdzenie pozwoliło uzyskać wyniki potwierdzające, jest niedokładność nastawienia obrabiarki. Przyczynę tę uznano za najbardziej prawdopodobną dzięki wynikającemu z analizy (porównanie median) potwierdzeniu istnienia statystycznie istotnych różnic pomiędzy wartościami błędu współosiowości otworów 1 i 2 uzyskiwanymi średnio w każdym z gniazd mocujących. Wniosek taki potwierdziły również wyniki porównania średnich wartości przesunięcia osi otworu 1 względem osi otworu 2 w osi x i w osi y dla wyrobów obrabianych w poszczególnych gniazdach mocujących. Na tej podstawie, niedokładność ustawienia obrabiarki uznano za najbardziej prawdopodobną przyczynę powstawania błędu współosiowości otworów 1 i 2.

Jednocześnie, pozostałe czynniki, które na etapie wstępnej analizy uznano za prawdopodobne przyczyny powstawania analizowanego błędu obróbki, w szczególności związane ze stwierdzonymi podczas przeprowadzonych analiz:

- istotnymi różnicami pomiędzy wartościami poszczególnych błędów obróbki stwierdzanych w wyrobach obrabianych w ramach różnych strumieni produkcji – w szczególności w odniesieniu do dwóch wrzecion,
- występowaniem punktów „odstających” wśród wyników pomiarów poszczególnych błędów obróbki – w wyrobach obrabianych narzędziem zamocowanym w lewym wrzecionie,
- prawdopodobnie istotnym znaczeniem płyt mocujących,

należałoby rozważyć jako potencjalnie istotnie wpływające na zmienność badanego procesu. Wiedza ta może zostać wykorzystana przy prowadzeniu ewentualnych następnych działań doskonalących w tym obszarze przedsiębiorstwa.

6.4. Planowanie rozwiązania

6.4.1. Generowanie rozwiązań

Ponieważ zidentyfikowaną najbardziej prawdopodobną przyczyną problemu była niedokładność nastawienia obrabiarki, jako rozwiązanie opracowano nowe ustawienie obrabiarki, polegające na:

- zmianie współrzędnych najazdu narzędzia na przedmiot obrabiany – zmiana w programie obróbczym,
oraz
- zmianie współrzędnych położenia przedmiotu obrabianego – zmiana w programie obróbczym oraz zmiana podpór bazujących.

Rozwiązanie zostało opracowane przez technologa badanego procesu, w oparciu o wiedzę technologiczną, bazując na wiarygodnych danych (dzięki przeprowadzonym analizom systemu pomiarowego) pozyskanych podczas analizy problemu.

Z uwagi na fakt, że w tym wypadku rozwiązanie problemu nie budziło wątpliwości, przy jego opracowaniu nie korzystano z technik pobudzania kreatywności

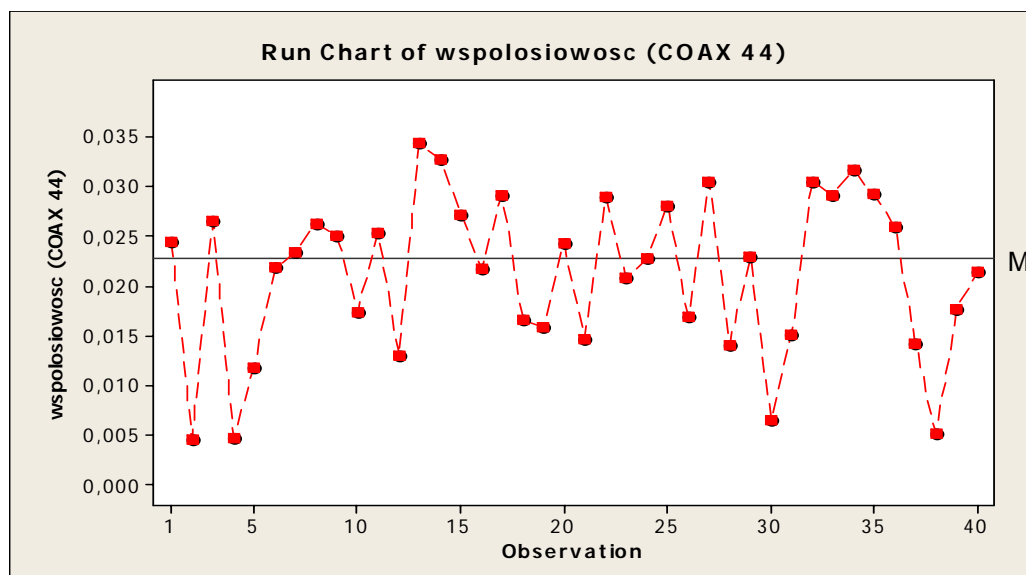
Ponadto – ponieważ podczas zbierania pomiarów i obserwacji procesu zauważono, że mycie gniazd mocujących stołu obrabiarki przed zamocowaniem korpusów jest wykonywane przez operatorów w sposób, który być może nie zapewnia wystarczającej czystości, przez co może wpływać na dokładność mocowania przedmiotów obrabianych – jako dodatkowe działanie zalecono pouczenie operatorów o odpowiednim sposobie płukania gniazd mocujących.

6.4.2. Wybór rozwiązania

Z uwagi na fakt, że zaproponowano jedno rozwiązanie problemu, nie było potrzeby dokonywania wyboru pomiędzy ewentualnymi alternatywnymi rozwiązaniami. Zaproponowane rozwiązanie uznano za spełniające podstawowe warunki ekonomiczne – zmiany ustawienia obrabiarki nie wiązały się z poniesieniem istotnych kosztów przez przedsiębiorstwo.

6.4.3. Weryfikacja rozwiązania

Po wprowadzeniu nowego ustawienia obrabiarki przeprowadzono zbieranie danych w celu zweryfikowania skuteczności opracowanego rozwiązania. Przeprowadzono 40 pomiarów wartości błędu współosiowości, na bazie których oceniono rezultaty wprowadzonych zmian. Wyniki przeprowadzonych pomiarów błędu współosiowości otworów 1 i 2 przedstawiono w formie graficznej na karcie przebiegu procesu (Rysunek 6.60).



Rys.6.60. Karta przebiegu procesu dla wyników pomiarów odchyłki współosiowości otworów 1 i 2, po wprowadzeniu rozwiązania (sierpień 2009)

Źródło: opracowanie własne

Sprawdzenie czy proces po wprowadzeniu zmian jest stabilny przeprowadzono również – w sposób analogiczny jak wcześniej (patrz Rozdział 6.2.7 i 6.3.4) – za pomocą trzech testów stabilności (Tabela 6.13).

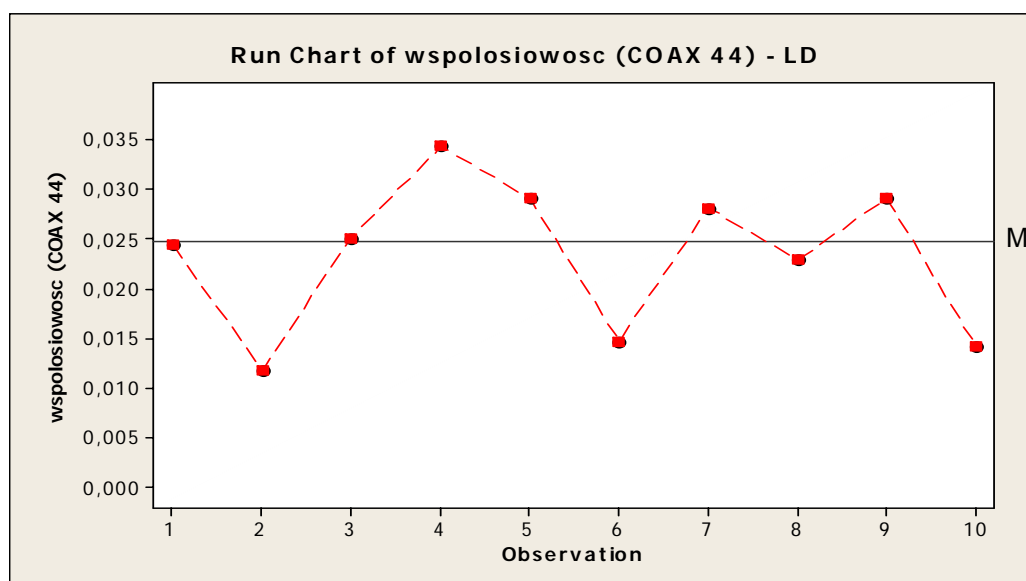
Tabela 6.13. Zestawienie wartości uzyskanych i granicznych, w ramach trzech testów stabilności stosowanych dla kart przebiegu procesu, w odniesieniu do wyników pomiarów odchyłki współosiowości otworów 1 i 2, po wprowadzeniu rozwiązania (sierpień 2009)

Wartości uzyskane	Wartości graniczne (według: Pyzdek, 2001, s.308-310)
maksymalna długość przebiegu	
5	9
liczba przebiegów	
24	od 15 do 26
najdłuższy przebieg wznoszący lub opadający	
4	6

Źródło: opracowanie własne

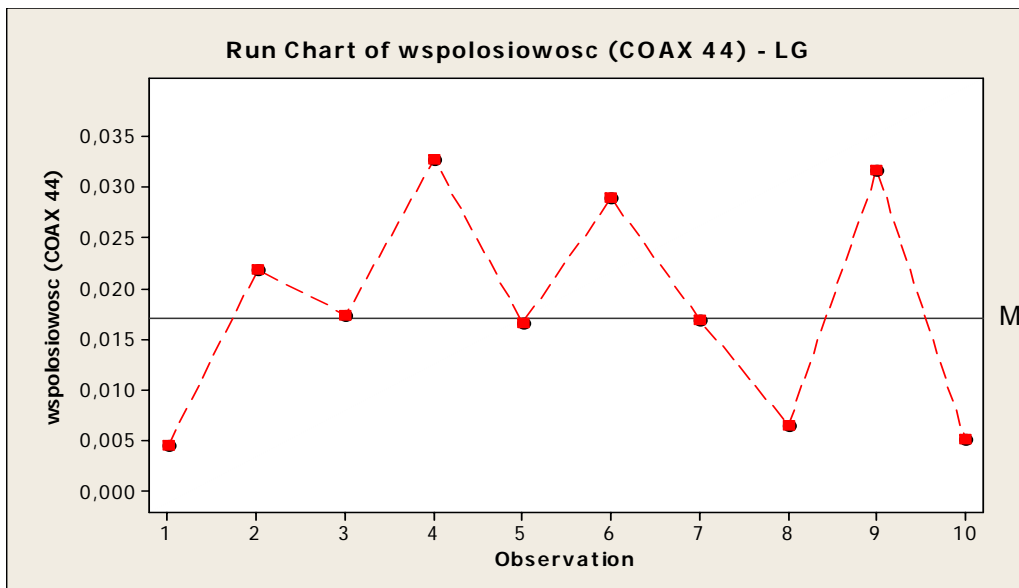
Przeprowadzona ocena wzrokowa karty przebiegu, a także testy, pozwoliły stwierdzić, że proces po wprowadzeniu rozwiązania nadal jest stabilny – znajduje się wyłącznie pod wpływem przyczyn losowych zmienności.

W analogiczny sposób dokonano oceny stabilności dla strumieni produkcji związanych z czterema gniazdami mocującymi. Odpowiednie karty przebiegu dla poszczególnych gniazd przedstawiono na Rysunkach 6.61 – 6.64, a wyniki przeprowadzonych testów stabilności dla sporządzonych kart zawarto w Tabeli 6.14.

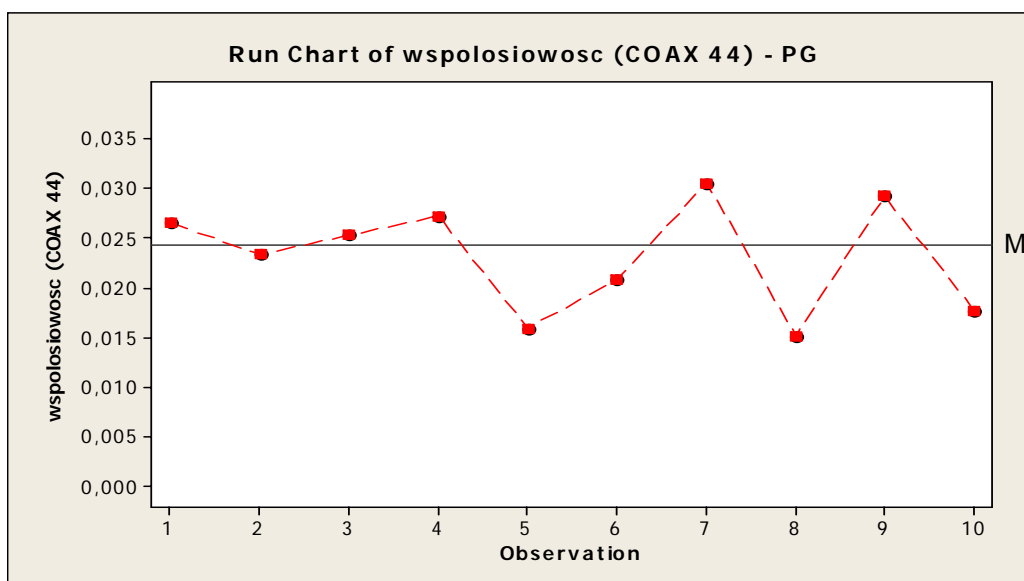


Rys.6.61. Karta przebiegu procesu dla wyników pomiarów odchyłki współosiowości otworów 1 i 2, po wprowadzeniu rozwiązania – gniazdo lewe dolne (LD) - (sierpień 2009)

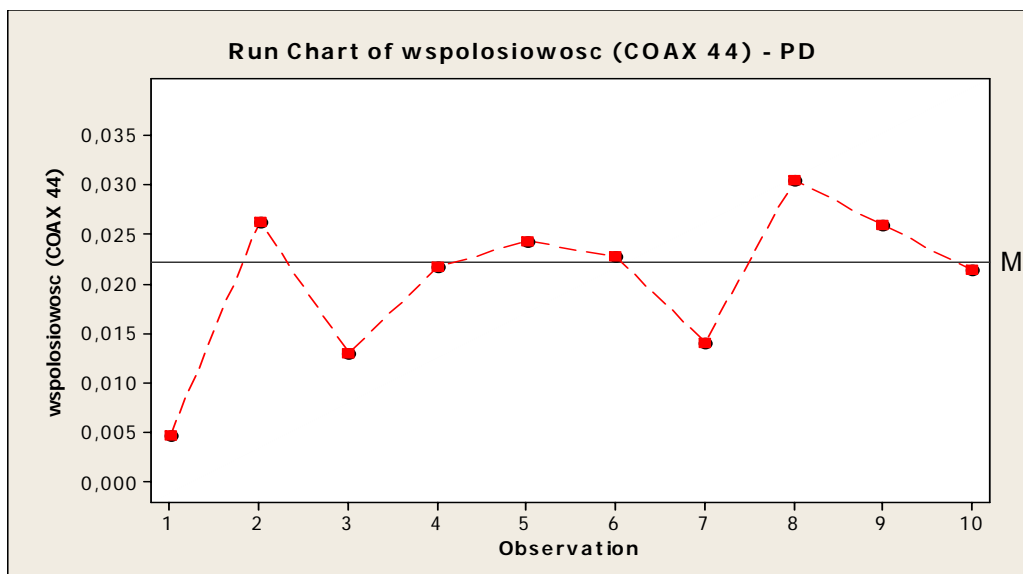
Źródło: opracowanie własne



Rys.6.62. Karta przebiegu procesu dla wyników pomiarów odchyłki współosiowości otworów 1 i 2, po wprowadzeniu rozwiązania – gniazdo lewe górne (LG) - (sierpień 2009)
 Źródło: opracowanie własne



Rys.6.63. Karta przebiegu procesu dla wyników pomiarów odchyłki współosiowości otworów 1 i 2, po wprowadzeniu rozwiązania – gniazdo prawe górne (PG) - (sierpień 2009)
 Źródło: opracowanie własne



Rys.6.64. Karta przebiegu procesu dla wyników pomiarów odchyłki współosiowości otworów 1 i 2, po wprowadzeniu rozwiązania – gniazdo prawe dolne (PD) - (sierpień 2009)

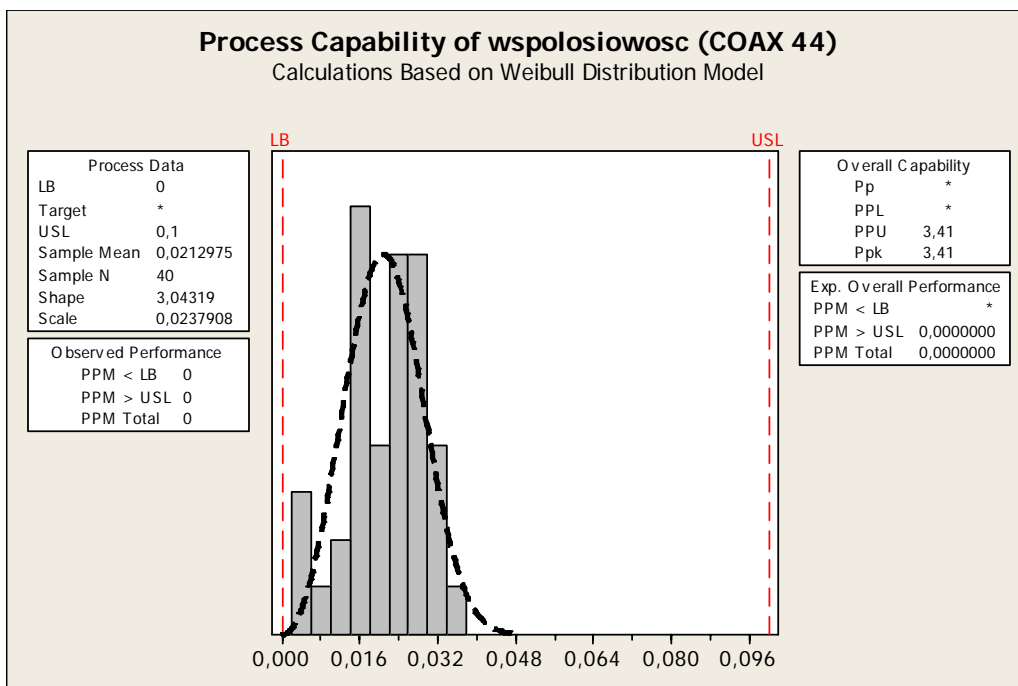
Źródło: opracowanie własne

Tabela 6.14. Zestawienie wartości uzyskanych i granicznych, w ramach trzech testów stabilności stosowanych dla kart przebiegu procesu, w odniesieniu do wyników pomiarów odchyłki współosiowości otworów 1 i 2, po wprowadzeniu rozwiązania – dla każdego z czterech wyróżnionych strumieni produkcji (sierpień 2009)

Wartości uzyskane - gniazdo lewe dolne (LD)	Wartości uzyskane - gniazdo lewe górne (LG)	Wartości uzyskane - gniazdo prawe górne (PG)	Wartości uzyskane - gniazdo prawe dolne (PD)	Wartości graniczne (według: Pyzdek, 2001, s.308-310)
maksymalna długość przebiegu				
3	3	2	2	5
liczba przebiegów				
7	7	8	7	od 3 do 8
najdłuższy przebieg wznoszący lub opadający				
2	2	2	2	5

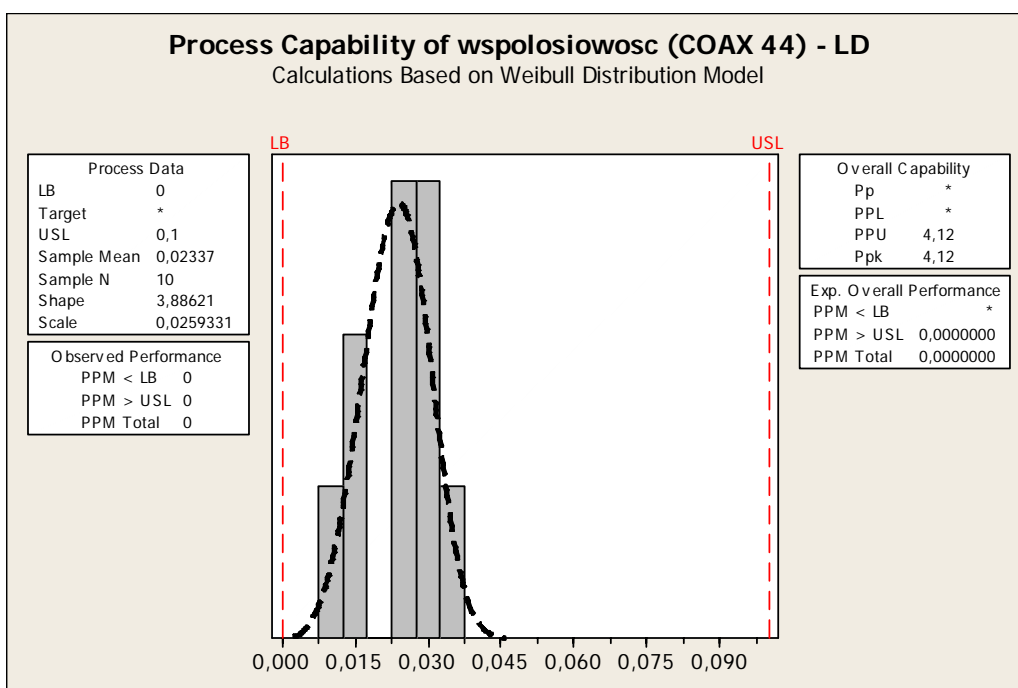
Źródło: opracowanie własne

Ponieważ zarówno proces traktowany jako całość, jak i poszczególne strumienie produkcji, na podstawie sporządzonych kart przebiegu i przeprowadzonych testów – w odniesieniu do wyników pomiarów odchyłki współosiowości otworów 1 i 2 po wprowadzeniu rozwiązania – mogą zostać uznane za stabilne (nie będące pod wpływem przyczyn specjalnych), zatem przystąpiono do analizy zdolności procesu i jego poszczególnych strumieni. Tak jak wcześniej (patrz Rozdział 6.2.8), zastosowano obliczenia wskaźników zdolności odpowiednie dla rozkładu Weibulla, uwzględniając jednocześnie fakt, że oprócz górnej granicy tolerancji równej 0,1 [mm], dane ograniczone są naturalnie przez 0 z lewej strony. Wyniki analizy zdolności dla całego procesu oraz poszczególnych strumieni produkcji przedstawiono na Rysunkach 6.65 – 6.69.



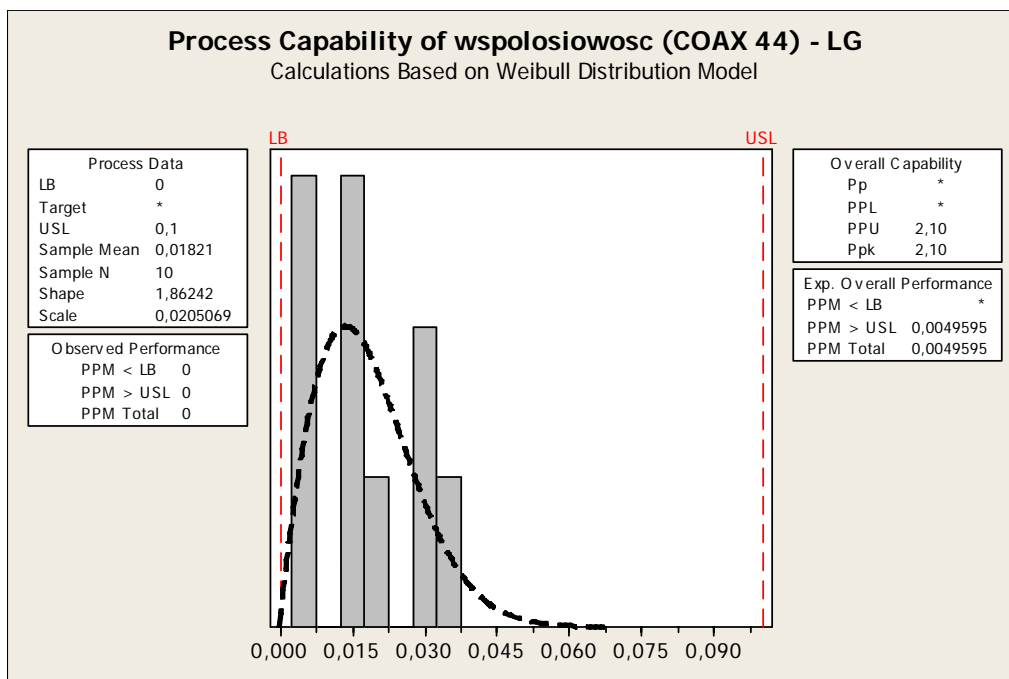
Rys.6.65. Analiza zdolności procesu w oparciu o wyniki pomiarów odchyłki współosiowości otworów 1 i 2, po wprowadzeniu rozwiązania (sierpień 2009)

Źródło: opracowanie własne



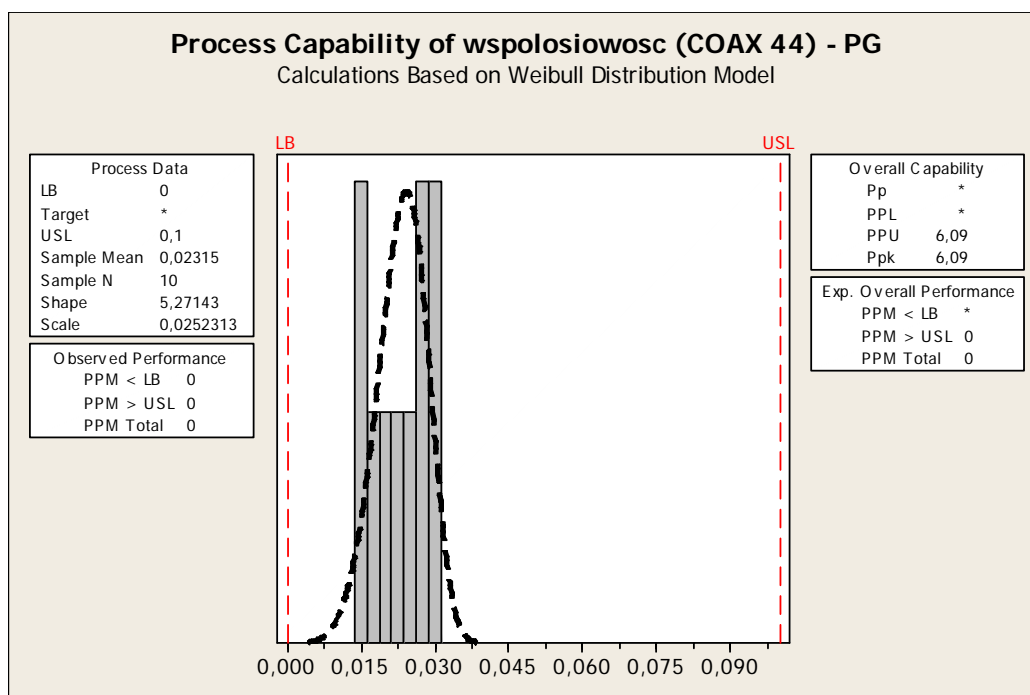
Rys.6.66. Analiza zdolności procesu w oparciu o wyniki pomiarów odchyłki współosiowości otworów 1 i 2, po wprowadzeniu rozwiązania – gniazdo lewe dolne (LD) - (sierpień 2009)

Źródło: opracowanie własne



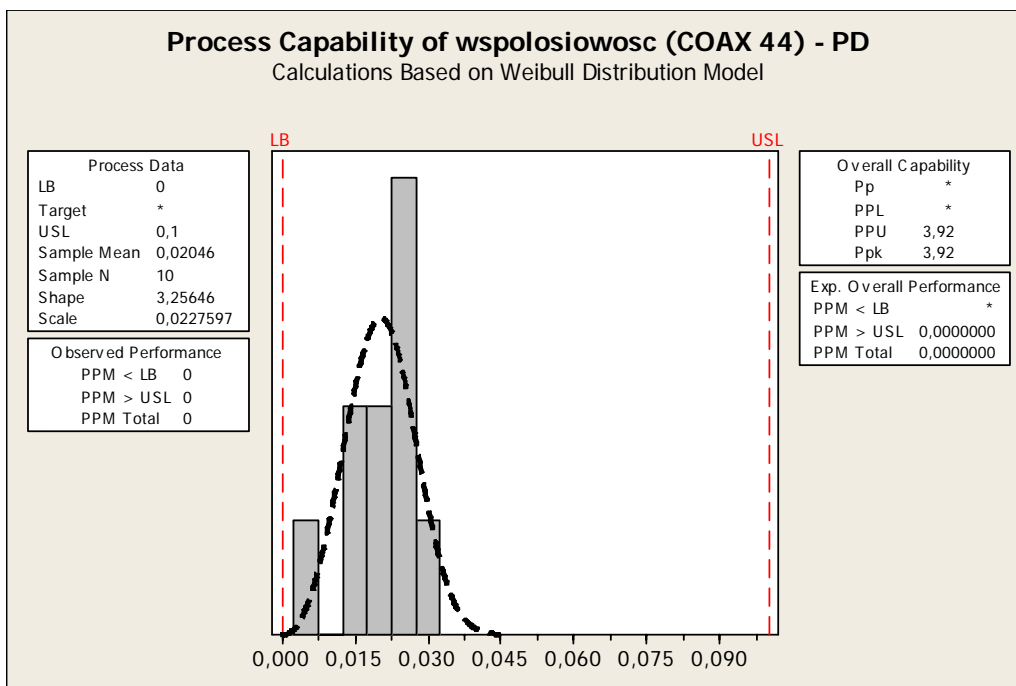
Rys.6.67. Analiza zdolności procesu w oparciu o wyniki pomiarów odchyłki współosiowości otworów 1 i 2, po wprowadzeniu rozwiązania – gniazdo lewe górne (LG) - (sierpień 2009)

Źródło: opracowanie własne



Rys.6.68. Analiza zdolności procesu w oparciu o wyniki pomiarów odchyłki współosiowości otworów 1 i 2, po wprowadzeniu rozwiązania – gniazdo prawe górne (PG) - (sierpień 2009)

Źródło: opracowanie własne



Rys.6.69. Analiza zdolności procesu w oparciu o wyniki pomiarów odchyłki współosiowości otworów 1 i 2, po wprowadzeniu rozwiązania – gniazdo prawe dolne (PD) - (sierpień 2009)

Źródło: opracowanie własne

Porównanie wartości odpowiednich wskaźników zdolności przed i po wprowadzeniu zmian przedstawiono w Tabeli 6.15.

Tabela 6.15. Porównanie wskaźników zdolności procesu, w odniesieniu do odchyłki współosiowości otworów 1 i 2, dla całego procesu oraz poszczególnych wyróżnionych strumieni produkcji, na podstawie wyników pomiarów zebranych przed i po wprowadzeniu rozwiązania

	Przed wprowadzeniem udoskonalenia (styczeń 2009)	Po wprowadzeniu udoskonalenia (sierpień 2009)
Wszystkie dane	$P_{pk} = 0,51$	$P_{pk} = 3,41$
gniazdo LD	$P_{pk} = 0,85$	$P_{pk} = 4,12$
gniazdo LG	$P_{pk} = 0,72$	$P_{pk} = 2,10$
gniazdo PG	$P_{pk} = 1,57$	$P_{pk} = 6,09$
gniazdo PD	$P_{pk} = 0,26$	$P_{pk} = 3,92$

Źródło: opracowanie własne

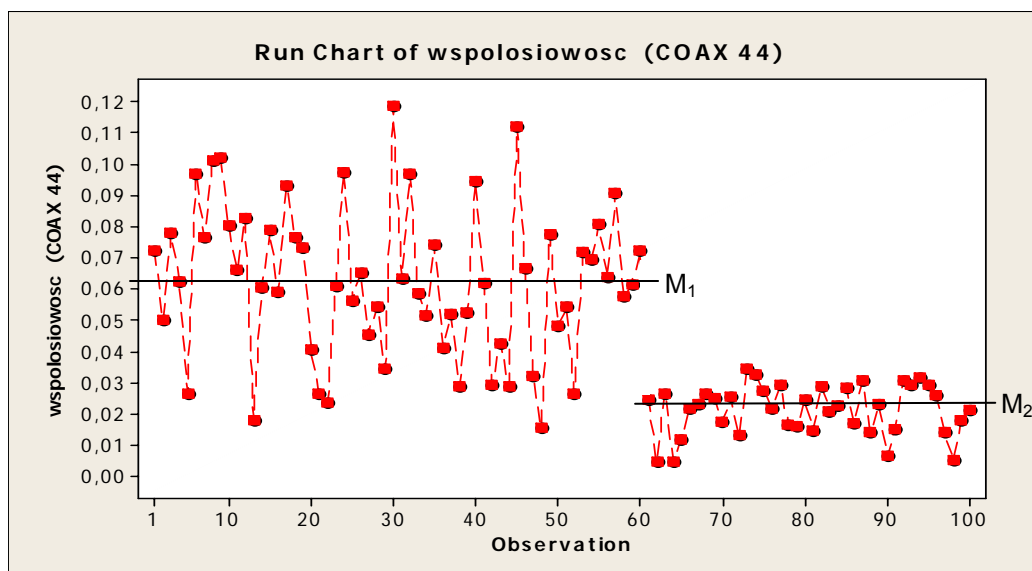
Przeprowadzona analiza zdolności procesu po wprowadzeniu rozwiązania oparta została na danych zebranych w okresie około 1 miesiąca, dlatego wyniki analizy zdolności procesu należy traktować jako orientacyjne, lecz jednocześnie wystarczające na potrzeby oceny skuteczności wprowadzonej zmiany.

Po pełnym wdrożeniu rozwiązania, zbieranie danych powinno być kontynuowane w ramach działań związanych ze sterowaniem jakością procesu. Dopiero na podstawie danych zebranych w dłuższym okresie czasu możliwe będzie obliczenie wskaźników zdolności analizowanego procesu uwzględniających jego długoterminową zmienność.

Niemniej jednak, wyniki pomiarów błędu współosiowości otworów 1 i 2, zebrane po wprowadzeniu rozwiązania (zarówno dla całego procesu, jak i poszczególnych czterech wyróżnionych strumieni produkcji), a także obliczone na ich podstawie wskaźniki zdolności,

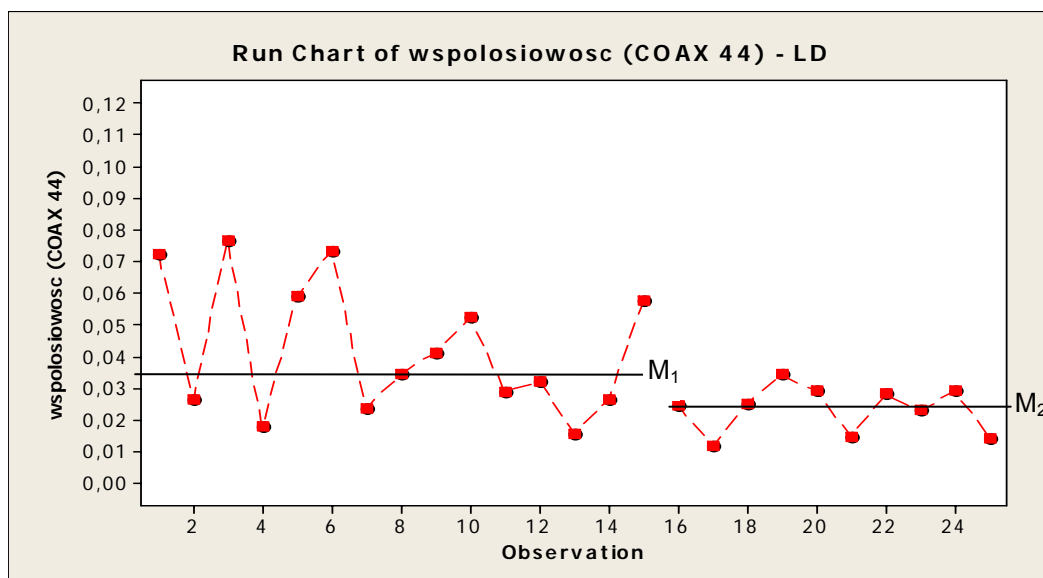
pozwalają wysunąć wniosek, że wprowadzone rozwiązanie spowodowało znaczne zmniejszenie zmienności analizowanego procesu, który w chwili obecnej może być uznany za proces w pełni spełniający wymagania w odniesieniu do badanej cechy, jaką jest współosiowość otworów 1 i 2. Po wprowadzeniu opracowanego rozwiązania wartość wskaźnika zdolności procesu wzrosła z $P_{pk} = 0,51$ do $P_{pk} = 3,41$.

Zmienność procesu przed i po wprowadzeniu rozwiązania przedstawiono na kartach przebiegu procesu ujmujących wszystkie dane (Rysunek 6.70), a także poszczególne wyróżnione strumienie produkcji (Rysunki 6.71 – 6.74).



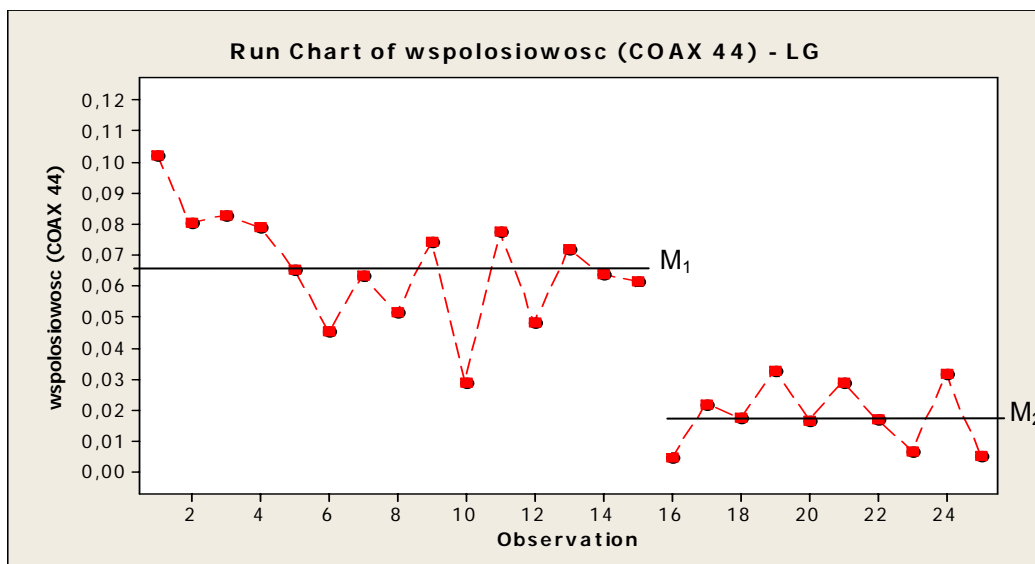
Rys.6.70. Karta przebiegu procesu dla wyników pomiarów odchyłki współosiowości otworów 1 i 2, przed i po wprowadzeniu rozwiązania (styczeń 2009 - sierpień 2009)

Źródło: opracowanie własne



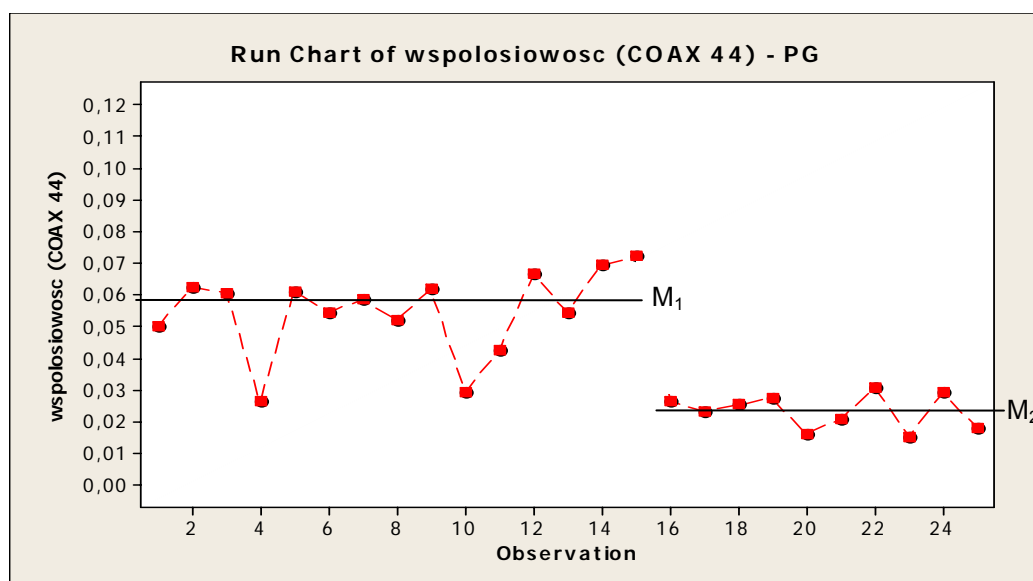
Rys.6.71. Karta przebiegu procesu dla wyników pomiarów odchyłki współosiowości otworów 1 i 2, przed i po wprowadzeniu rozwiązania (styczeń 2009 - sierpień 2009) – gniazdo lewe dolne (LD)

Źródło: opracowanie własne



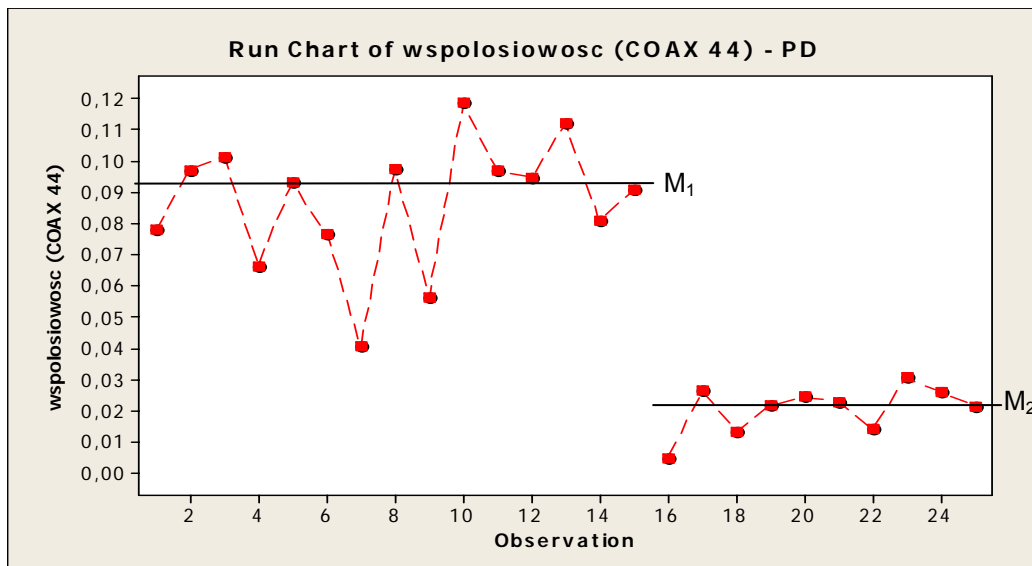
Rys.6.72. Karta przebiegu procesu dla wyników pomiarów odchyłki współosiowości otworów 1 i 2, przed i po wprowadzeniu rozwiązania (styczeń 2009 - sierpień 2009) – gniazdo lewe górne (LG)

Źródło: opracowanie własne



Rys.6.73. Karta przebiegu procesu dla wyników pomiarów odchyłki współosiowości otworów 1 i 2 przed i po wprowadzeniu rozwiązania (styczeń 2009 - sierpień 2009) – gniazdo prawe górne (PG)

Źródło: opracowanie własne



Rys.6.74. Karta przebiegu procesu dla wyników pomiarów odchyłki współosiowości otworów 1 i 2 przed i po wprowadzeniu rozwiązania (styczeń 2009 - sierpień 2009) – gniazdo prawe dolne (PD)

Źródło: opracowanie własne

Jak widać na powyższych kartach przebiegu – zarówno w odniesieniu do wszystkich zebranych danych, jak i w podziale na cztery wyróżnione strumienie produkcji – wraz z wprowadzoną zmianą osiągnięto wyraźną redukcję zmienności naturalnej analizowanego procesu, jak i przesunięcie jego poziomu (określonego za pomocą miary skupienia rozkładu danych, jaką jest mediana).

Widoczna na wykresach wyraźna poprawa stanu procesu – zarówno w odniesieniu do wszystkich wyników pomiaru odchyłki współosiowości otworów 1 i 2, jak i wyróżnionych strumieni produkcji – pozwala stwierdzić, że dzięki wprowadzonemu udoskonaleniu rozwiązano problem zbyt dużej zmienności wartości błędu współosiowości otworów, powstającego podczas obróbki wyrobów w operacji 40.

Wyniki osiągnięte dzięki wdrożeniu zidentyfikowanego rozwiązania problemu uznano za satysfakcjonujące.

6.5. Wdrożenie rozwiązania

Ponieważ wprowadzone rozwiązanie okazało się skuteczne i przyczyniło się do znacznej redukcji zmienności badanego procesu, wprowadzoną zmianę przyjęto jako nowy standard w tym procesie.

Utrzymanie zmian

Nowe ustawienie obrabiarki zostało wprowadzone do stałego toku procesu. Ponadto, wprowadzono także nowy sposób mycia gniazd mocujących.

W celu zapewnienia, że proces będzie utrzymywany w stanie stabilnym, przewidziano wprowadzenie odpowiednich kart kontrolnych (lub kart przebiegu procesu) – zarówno w odniesieniu do całego procesu, jak i zidentyfikowanych strumieni produkcji (związanych z gniazdami mocującymi na stole obrabiarki). Ewentualne korygowanie ustawienia obrabiarki (w aspekcie jakościowym) powinno odbywać się jedynie na podstawie wskazań

wynikających z wprowadzonej karty kontrolnej (karty przebiegu procesu), aby zapobiec przeregulowaniu procesu.

Ponieważ analizy przeprowadzono dla jednej z trzech obrabiarek, które wykonują operację 40, zaplanowano przeprowadzenie podobnych analiz – odpowiednio ukierunkowanych, w oparciu o wyniki przeprowadzonych badań – dla pozostałych dwóch obrabiarek.

Biblioteka przypadków

W celu aktywnego i świadomego budowania wiedzy procesowej w przedsiębiorstwie zaproponowano rozpoczęcie tworzenia tzw. *Biblioteki przypadków*, w której gromadzone będą informacje o wszystkich zakończonych sukcesem działaniach doskonalących, dzięki czemu budowany będzie zbiór potencjalnych przyczyn problemów, specyficzny dla danego przedsiębiorstwa.

6.6. Weryfikacja opracowanej Metodyki redukcji zmienności procesów obróbki skrawaniem – podsumowanie

Podsumowując, należy stwierdzić, że dzięki zastosowaniu opracowanej *Metodyki redukcji zmienności procesów obróbki skrawaniem* w rzeczywistym procesie produkcyjnym:

- Zidentyfikowano zbiór 18 potencjalnych przyczyn analizowanego błędu obróbki – wykorzystując wiedzę technologiczną zgromadzoną w *Zestawieniu potencjalnych przyczyn błędów obróbki skrawaniem* (Załącznik A) oraz przedstawioną w formie systemu ekspertowego (Załącznik B).
- Ze zbioru potencjalnych przyczyn wyłoniono najbardziej prawdopodobną przyczynę analizowanego błędu obróbki – na podstawie rezultatów przeprowadzonych analiz oraz w oparciu o posiadaną wiedzę procesową i technologiczną.
- Zidentyfikowano w analizowanym procesie tzw. strumienie produkcji, co pozwoliło dokonać szczegółowej analizy i lepiej poznać zależności zachodzące w procesie.
- Doprowadzono do znacznej redukcji zmienności analizowanego procesu, której miarą jest zwiększenie wartości wskaźnika zdolności procesu P_{pk} z 0,51 do 3,41.
- Wszystkie działania przeprowadzono w oparciu o jasno określony algorytm postępowania, pozwalający na wybór odpowiedniej metody lub narzędzia w danej sytuacji.
- Powiększono wiedzę procesową w przedsiębiorstwie, dostarczając nowych informacji na temat zależności pomiędzy czynnikami występującymi w analizowanym procesie a jego charakterystyką wyjściową.
- Zidentyfikowano potencjalne dalsze kierunki doskonalenia analizowanego procesu, które mogą zostać wykorzystane w przyszłości, jeśli zajdzie taka potrzeba.

7. PODSUMOWANIE I WNIOSKI

W niniejszej pracy przedstawiono proces opracowania i weryfikacji *Metodyki redukcji zmienności procesów obróbki skrawaniem*.

W oparciu o przeprowadzone szerokie studia literaturowe, a także analizę rzeczywistych przeprowadzanych w przedsiębiorstwach projektów doskonalących, zrealizowano zaplanowane na wstępie zadania:

- Zidentyfikowano i omówiono lukę poznawczą, wskazującą na potrzebę opracowania spójnej metodyki pozwalającej na doskonalenie procesów produkcyjnych poprzez redukcję ich zmienności.
- Przeanalizowano podejście do zagadnienia zmienności procesów związane z technologią obróbki skrawaniem. Omówiono główne grupy przyczyn błędów obróbki powstających w procesach obróbki skrawaniem, a także zidentyfikowano i przedstawiono cztery podstawowe sposoby ich klasyfikacji. Przeanalizowano problem redukcji zmienności w procesach produkcyjnych obróbki skrawaniem oraz wyróżniono i omówiono trzy główne podejścia do tego problemu, stosowane w praktyce.
- Przeprowadzono analizę pojęcia zmienności procesu oraz podejścia do doskonalenia procesów poprzez redukcję ich zmienności, wywodzącego się z obszaru Zarządzania Jakością. Zebrano, porównano i omówiono 15 sposobów Doskonalenia procesów. Dokonano przeglądu kryteriów klasyfikacji metod, technik i narzędzi doskonalenia, stosowanych w literaturze w celu ułatwienia ich wyboru. Zidentyfikowano zbiór 61 najczęściej stosowanych i zalecanych metod, technik i narzędzi doskonalenia, które sklasyfikowano według przyjętych kryteriów.

Na podstawie przeprowadzonych analiz:

- Sformułowano wnioski i główne założenia do opracowania *Metodyki redukcji zmienności procesów obróbki skrawaniem*.

W efekcie:

- Opracowano *Metodykę redukcji zmienności procesów obróbki skrawaniem*, którą zaprezentowano, szczegółowo omawiając wszystkie jej etapy.
- Opracowaną metodykę porównano z przebiegiem rzeczywistych projektów doskonalących, przeprowadzonych w dwóch przedsiębiorstwach produkcyjnych. Wskazano zalety opracowanej metodyki oraz jej potencjalną zdolność do usprawnienia przebiegu działań doskonalących, wynikającą przede wszystkim z jasno określonego algorytmu postępowania, a także wykorzystania bogatego zasobu wiedzy technologicznej.
- Skuteczność opracowanej metodyki zweryfikowano w warunkach rzeczywistego procesu produkcyjnego. Zastosowanie opracowanej metodyki w procesie produkcji korpusów umożliwiło identyfikację czynników wpływających na zmienność analizowanego procesu. W wyniku przeprowadzenia działań doskonalących, dzięki zastosowaniu opracowanej metodyki, osiągnięto znaczną redukcję zmienności analizowanego procesu, zwiększając w efekcie jego zdolność, co potwierdza wzrost wartości wskaźnika zdolności procesu z $P_{pk} = 0,51$ (przed rozpoczęciem działań doskonalących) do $P_{pk} = 3,41$ (po zastosowaniu opracowanej metodyki).

Do zalet opracowanej *Metodyki redukcji zmienności procesów obróbki skrawaniem* należy zaliczyć:

- Oparcie struktury metodyki na uniwersalnym cyklu doskonalenia PDSA.
- Przyłożenie dużej wagi do etapów związanych z planowaniem działań doskonalących (odpowiadających krokowi *Planuj* cyklu PDSA), w celu prawidłowego zdiagnozowania problemu, aby zapewnić możliwie największe prawdopodobieństwo skutecznego jego rozwiązania.
- Wykorzystanie ograniczonego zbioru wybranych metod, technik i narzędzi doskonalenia procesów, zaliczających się do najczęściej zalecanych i stosowanych.
- Określenie jednoznacznego algorytmu postępowania, zawierającego ustalone kryteria wyboru odpowiednich metod i narzędzi doskonalenia.
- Połączenie sposobu postępowania oraz metod i narzędzi wywodzących się z obszaru Zarządzania Jakością, a w szczególności Doskonalenia procesów, z wiedzą z zakresu technologii obróbki skrawaniem.
- Wykorzystanie zidentyfikowanego, zgromadzonego i uporządkowanego szerokiego zasobu wiedzy technologicznej, umieszczonego w opracowanym na potrzeby metodyki *Zestawieniu potencjalnych przyczyn błędów obróbki skrawaniem* (Załącznik A do niniejszej pracy), zawierającym 366 zidentyfikowanych potencjalnych przypadków.
- Wsparcie praktycznego zastosowania opracowanej metodyki, dzięki możliwości wygodnego dla użytkownika dostępu do zgromadzonej na potrzeby metodyki wiedzy technologicznej, przedstawionej w formie opracowanego systemu ekspertowego *Identyfikacja potencjalnych przyczyn błędów obróbki skrawaniem* (Załącznik B do niniejszej pracy), zawierającego 154 ze zidentyfikowanych potencjalnych przypadków.
- Ułatwienie budowania wiedzy procesowej w przedsiębiorstwie, a także zarządzania nią, poprzez zaproponowaną *Bibliotekę przypadków*, która może być stale uzupełniana informacjami dotyczącymi kolejnych przeprowadzonych z sukcesem projektów doskonalących.

Należy zatem stwierdzić, że zrealizowano postawiony cel pracy, którym było wypełnienie zidentyfikowanej luki poznawczej, poprzez opracowanie *Metodyki redukcji zmienności procesów obróbki skrawaniem*, łączącej dwa podejścia do doskonalenia procesów: podejście związane z teorią technologii procesów oraz podejście wywodzące się z obszaru Zarządzania Jakością. Przeznaczeniem opracowanej metodyki jest jej praktyczne zastosowanie, które zostało ułatwione dzięki określeniu jednoznacznego sposobu postępowania – poprzez wskazanie kolejnych kroków, jakie należy podjąć, a także odpowiednich metod, technik i narzędzi doskonalenia, których wykorzystanie umożliwia przeprowadzenie działań zmierzających do redukcji zmienności procesów produkcyjnych. Oprócz tego, wiedza technologiczna, będąca istotnym elementem opracowanej metodyki, została zgromadzona w formie tabelarycznej (Załącznik A), a także w wygodnej dla użytkownika formie systemu ekspertowego (Załącznik B), który może być uzupełniany o kolejne informacje. W efekcie, opracowana metodyka, dzięki wykorzystaniu iteracyjnego procesu zdobywania wiedzy, wspiera budowanie wiedzy procesowej w przedsiębiorstwie.

Proponowane dalsze prace nad opracowaną *Metodyką redukcji zmienności procesów obróbki skrawaniem* powinny obejmować:

- Dalsze testowanie działania opracowanej metodyki w warunkach rzeczywistych procesów produkcyjnych.
- Powiększanie zasobu wykorzystywanej w metodyce wiedzy technologicznej, poprzez rozszerzanie zbioru potencjalnych przyczyn błędów obróbki skrawaniem (Załącznik A).
- Powiększanie zawartości bazy wiedzy zaproponowanego systemu ekspertowego (Załącznik B) o kolejne potencjalne przyczyny błędów obróbki skrawaniem.

Możliwe wydaje się także rozszerzenie zastosowania opracowanej metodyki na inne rodzaje procesów.

LITERATURA:

- ACZEL, A.D. 2000. *Statystyka w zarządzaniu. Pełny wykład*. Tłumaczenie: Zbigniew Czerwiński i Wojciech Latusek. Warszawa: Wydawnictwo Naukowe PWN
- ADAMS, M., SCHROER, B.J., STEWART, S.K. 1997. QuickStep process improvement: Time-compression as a management strategy. *Engineering Management Journal*, Vol. 9, No. 2, s.21-32
- AGAPIOU, J.S., STEINHILPER, E., GU, F., BANDYOPADHYAY, P. 2003. Modeling Machining Errors on a Transfer Line to Predict Quality. *Journal of Manufacturing Processes*, Vol. 5, No. 1, s.1-12
- ANDRZEJEWSKI, M., WIECZOROWSKI, K., ŻUREK, J. 1993. Dokładność obróbki. W: H. KUNICKI, red. *Poradnik inżyniera: obróbka skrawaniem. Tom II*. Warszawa: Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, s.552-633
- ANTONY, J. 2006. Taguchi or classical design of experiments: a perspective from a practitioner. *Sensor Review*, Vol. 26, No. 3, s.227-230
- ANTONY, J., FOUTRIS, F., BANUELAS, R., THOMAS, A. 2004. Using Six Sigma. *IEE Manufacturing Engineer*, Vol. 83, Issue 1, s.10-12
- ANTONY, J., KAYE, M., FRANGOU, A. 1998. A strategic methodology to the use of advanced statistical quality improvement techniques. *The TQM Magazine*, Vol. 10, No. 3, s.169-176
- AOYAMA, T., INASAKI, I. 2001. Performance of HSK tool interfaces under high rotational Speed. *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, Vol. 50, Issue 1, s.281-284
- BARAKAT, N.A., SPENCE, A.D., ELBESTAWI, M.A. 2000. Adaptive compensation of quasi-static errors for an intrinsic machine. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, Vol. 40, Issue 15, s.2267-2291
- BARANOWICZ, M., OLEJNIK, M., KOCH, T. 2006. Design of Experiments - One of the Key Tools in Quality Engineer's Toolbox. W: E. CHLEBUS, red. *Inżynieria Produkcji. Wiedza - Wizja - Programy Ramowe*. Wrocław: Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, s.111-116
- BERTELS, T. red. 2003. *Rath & Strong's Six Sigma Leadership Handbook*. Hoboken, NJ: John Wiley & Sons, Inc.
- BOX, G.E.P., HUNTER, W.G., HUNTER, J.S. 1978. *Statistics for Experimenters. An introduction to design, data analysis, and model building*. New York: John Wiley & Sons
- BRANDT, S. 1998. *Analiza danych. Metody statystyczne i obliczeniowe*. Tłumaczenie: Lech Szymanowski. Warszawa: Wydawnictwo Naukowe PWN
- BRECHER, C., HIRSCH, P. 2004. Compensation of Thermo-elastic Machine Tool Deformation Based on Control Internal Data. *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, Vol. 53, Issue 1, s.299-304
- BREYFOGLE, F.W. 2003. *Implementing Six Sigma: Smarter Solutions Using Statistical Methods*. Hoboken, NJ: John Wiley & Sons

- BREYFOGLE, F.W., MEADOWS, B. 2001. Bottom-Line Success With Six Sigma. *Quality Progress*, Vol. 34, No. 5, s.101-104
- BRITZ, G.C., EMERLING, D.W., HARE, L.B., HOERL, R.W., JANIS, S.J., SHADE, J.E. 2000. *Improving Performance Through Statistical Thinking*. Milwaukee, WI: ASQ Quality Press
- BYRNE, G., DORNFELD, D., DENKENA, B. 2003. *Advancing Cutting Technology*. [online] Laboratory for Manufacturing and Sustainability. Consortium on Deburring and Edge Finishing, University of California, Berkeley [pobrano 20.01.2009]
dostęp: http://repositories.cdlib.org/lma/codef/byrne_03_1/
- CEGLAREK, D., HUANG, W., ZHOU, S., DING, Y., KUMAR, R., ZHOU, Y. 2004. Time-Based Competition in Multistage Manufacturing: Stream-of-Variation Analysis (SOVA) Methodology – Review. *The International Journal of Flexible Manufacturing Systems*, Vol. 16, No. 1, s.11-44
- CEGLAREK, D., SHI, J. 1996. Fixture Failure Diagnosis for Autobody Assembly Using Pattern Recognition. *Journal of Engineering for Industry*, Vol. 118, No. 1, s.55-66
- CHEN, S-Y., BIN, H-Z. 2001. Machining Complex Oriented Compensation System for Generalized Kinematic Errors. *Journal of Shanghai University (English Edition)*, Vol. 5, No. 2, s.136-142
- CHOROSZY, B. 2000. *Technologia maszyn*. Wrocław: Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej
- CICHOSZ, P. 2004. Dobór narzędzi i parametrów skrawania. W: H. ŻEBROWSKI, red. *Techniki wytwarzania: obróbka wiórowa, ścierna, erozyjna*. Wrocław: Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, s.289-303
- CICHOSZ, P., PETYNIAK, A. 2003. Wyważanie obrotowych narzędzi skrawających. *Mechanik* 10/2003, s.595-600
- COMPONATION, P.J., FARRINGTON, P.A. 2000. Identification of effective problem-solving tools to support continuous process improvement teams. *Engineering Management Journal*, Vol. 12, No. 1, s.23-29
- DE BONO, E. 2008. *Myślenie lateralne. Idee na przekór schematom*. Tłumaczenie: Cezary Welsyng. Gliwice: Helion
- DE KONING, H., DE MAST, J. 2006. A rational reconstruction of Six-Sigma's breakthrough cookbook. *International Journal of Quality and Reliability Management*, Vol. 23, No. 7, s.766-787
- DeFEO, J.A., BARNARD, W.W. 2004. *Juran Institute's Six Sigma: Breakthrough and Beyond*. USA: McGraw-Hill
- DEMING, W.E. 1994. *Out of the crisis*. Cambridge: Cambridge University Press
- DIETRICH, E., SCHULZE, A. 2000. *Metody statystyczne w kwalifikacji środków pomiarowych maszyn i procesów produkcyjnych*. Tłumaczenie: Zbigniew Wojtas. Warszawa: Notika System

- DING, Y., CEGLAREK, D., SHI, J. 2002. Fault Diagnosis of Multistage Manufacturing Processes by Using State Space Approach. *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, Vol. 124, Issue 2, s.313-322
- DJURDJANOVIC, D., NI, J. 2006. Stream-of-Variation (SoV)-Based Measurement Scheme Analysis in Multistation Machining Systems. *IEEE Transactions On Automation Science and Engineering*, Vol. 3, No. 4, s.407-422
- DOLAN, T. 2003. Best Practices In Process Improvement. *Quality Progress*, Vol. 36, No. 8, s.23-28
- DOOLEY, K., ANDERSON, J., LIU X. 2000. Process Quality Knowledge Bases. *Journal of Quality Management*, Vol. 4, No. 2, s.207-224
- EL-HAIK, B., ROY, D.M. 2005. *Service Design for Six Sigma: A Roadmap for Excellence*. Hoboken, NJ: John Wiley & Sons
- ERTAN, B. 1998. *Analysis of Key Characteristic Methods and Enablers Used in Variation Risk Management*. [online] M.Sc. thesis, Massachusetts Institute of Technology [pobrano 29.06.2007] dostep: <http://www.nltx.com/thornton/98-ertan.pdf>
- ESTREMS, M., SANCHEZ, H.T., FAURA F. 2003. Influence of Fixtures on Dimensional Accuracy in Machining Processes. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 21, No. 5, s.384-390
- FEIGENBAUM, A.V. 1991. *Total Quality Control*. Singapore: McGraw-Hill, Inc.
- FELD, M. 2000. *Podstawy projektowania procesów technologicznych typowych części maszyn*. Warszawa: Wydawnictwa Naukowo-Techniczne
- FLORUSSEN, G.H.J., DELBRESSINE, F.L.M., SCHELLEKENS, P.H.J. 2003. Assessing Thermally Induced Errors of Machine Tools by 3D Length Measurements. *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, Vol. 52, Issue 1, s.333-336
- FRANK, M. 2002. What is “engineering systems thinking”? *Kybernetes*, Vol. 31, No. 9/10, s.1350-1360
- GARBEN, A., FURNSINN, M., RUSCHKOWSKI, B. 1995. ESPANDA: For Solving Problems by Applying the Principle of Similarity. *Expert Systems with Applications*, Vol. 8, No. 2, s.249-254
- GARDNER, R.A. 2001. Resolving the Process Paradox. *Quality Progress*, Vol. 34, No. 3, s.51-59
- GÓRSKI, E. 1991. Wiadomości ogólne. W: E. KŁOS, red. *Poradnik inżyniera: obróbka skrawaniem. Tom I*. Warszawa: Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, s.1-18
- GRZESIK, W. 1998. *Podstawy skrawania materiałów metalowych*. Warszawa: Wydawnictwa Naukowo-Techniczne
- GUPTA, P. 2006. Beyond PDCA – A New Process Management Model. *Quality Progress*, Vol. 39, No. 7, s.45-52
- HAMROL, A. 2007. *Zarządzanie jakością z przykładami*. Warszawa: Wydawnictwo Naukowe PWN

- HAO, W., HONGTAO, Z., QIANJAN, G., XIUSHAN, W., JIANGUO, Y. 2008. Thermal error optimization modeling and real-time compensation on a CNC turning center. *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 207, No. 1-3, s.172-179
- HARE, L.B. 2001. Chicken Soup for Processes. *Quality Progress*, Vol. 34, No. 8, s.76-79
- HARVEY, J. 2004. Match the Change Vehicle and Method To the Job. *Quality Progress*, Vol. 37, No. 1, s.41-48
- HSIEH, C.-T., LIN, B., MANDUCA, B. 2007. Information technology and Six Sigma implementation. *The Journal of Computer Information Systems*, Vol. 47, No. 4, s.1-10
- HU, S.J. 1997. Stream-of-Variation Theory for Automotive Body Assembly. *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, Vol. 46, Issue 1, s.1-6
- HUMIENNY, Z. red. 2004. *Specyfikacje geometrii wyrobów (GPS). Podręcznik europejski*. Warszawa: Wydawnictwa Naukowo-Techniczne
- JEDNORÓG, A. 2001. *Adaptacyjny układ sterowania jakością w systemie wytwarzania*. Praca doktorska, Politechnika Wroclawska
- JEDNORÓG, A., OLEJNIK, M., TORCZEWSKI, K. 2003. Wykorzystanie metod i technik Zarządzania Jakością w polskich przedsiębiorstwach. W: *Automatyzacja produkcji. Nauka – Wiedza – Innowacje. Tom I. Referaty plenarne i sesyjne*. Wrocław: Oficyna Wydawnicza Politechniki Wroclawskiej, s.437-444
- JĘDRZEJEWSKI, J., MODRZYCKI, W., KOWAL, Z., KWAŚNY, W., WINIARSKI, Z. 2007. Precise modelling of HSC machine tool thermal behaviour. *Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering*, Vol. 24, Issue 1, s.245-252
- JOHNSON, C.N. 2002. The Benefits of PDCA. *Quality Progress*, Vol. 35, No. 5, s.120
- JÓZWIK, J. 2002. Termograficzna analiza rozkładu temperatury na powierzchni przedmiotu obrabianego podczas toczenia nieortogonalnego. *Przegląd Mechaniczny* 4/2002, s.24-28
- JÓZWIK, J., JACNIACKA, E., LIPSKI, J. 2004. Wpływ warunków skrawania na dokładność geometryczną wyrobu. *Mechanik* 10/2004, s.13-18
- JURAN, J.M., GODFREY, A.B. red. 1999. *Juran's Quality Handbook*. USA: McGraw-Hill
- JURAN, J.M., GRZYNA, F.M. 1974. *Jakość: projektowanie i analiza*. Tłumaczenie: Leszek Zienkowski. Warszawa: WNT
- KACALAK, W. 2005. Granice dokładności obróbki. *Mechanik*, 7/2005, s.585-587
- KACZMAREK, J. 1970. *Podstawy obróbki wiórowej, ściernej i erozyjnej*. Warszawa: Wydawnictwa Naukowo-Techniczne
- KARASZEWSKI, R. 2005. *Zarządzanie jakością: koncepcje, metody i narzędzia stosowane przez liderów światowego biznesu*. Toruń: TNOiK "Dom Organizatora"
- KARPIŃSKI, T. 2007. *Inżynieria produkcji*. Warszawa: Wydawnictwa Naukowo-Techniczne
- KOCH, T., OLEJNIK, M. 2009. Importance of Process Variability Identification and Overview of Main Approaches to Process Quality Management. *Management*, Vol. 13, No. 1, s.283-293

- KOLMAN, R., MELLER, E., MELLER, A. 1969. *Dokładność kształtu i położenia w procesach technologicznych*. Warszawa: Wydawnictwa Naukowo-Techniczne
- LANGLEY, G.J., NOLAN, K.M., NOLAN, T.W., NORMAN, C.L., PROVOST, L.P. 1996. *The Improvement Guide: A Practical Approach to Enhancing Organizational Performance*. San Francisco, CA: Jossey-Bass Publishers
- LEE, S.-G., YANG, S.-H. 2003. Improvement of Product Accuracy in Freeform Surface Machining. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 21, No. 12, s.972-979
- LIAO, Y.G., HU, S.J. 2001. An Integrated Model of a Fixture-Workpiece System for Surface Quality Prediction. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 17, No. 11, s.810-818
- LIBERATORE, R.L. 2001. Teaching the Role of SPC In Industrial Statistics. *Quality Progress*. Vol. 34, No. 7, s.89-94
- LIU, D.-R., KE, C.-K. 2007. Knowledge support for problem-solving in a production process: A hybrid of knowledge discovery and case-based reasoning. *Expert Systems with Applications*, Vol. 33, No. 1, s.147-161
- LIU, Z.-Q. 2001. Methodology of Parametric Programming for Error Compensation on CNC Centres. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 17, No. 8, s.570-574
- LOOSE, J.-P., ZHOU, S., CEGLAREK, D. 2007. Kinematic Analysis of Dimensional Variation Propagation for Multistage Machining Processes With General Fixture Layouts. *IEEE Transactions On Automation Science and Engineering*, Vol. 4, No. 2, s.141-152
- LOPEZ DE LACALLE, L.N., LAMIKIZ, A., SANCHEZ, J.A., SALGADO, M.A. 2004. Effects of tool deflection in the high-speed milling of inclined surfaces. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 24, No. 9-10, s.621-631
- ŁAŃCUCKI, J. red. 2006. *Podstawy kompleksowego zarządzania jakością TQM*. Poznań: Wydawnictwo Akademii Ekonomicznej
- ŁUCZAK, J., MATUSZAK-FLEJSZMAN, A. 2007. *Metody i techniki zarządzania jakością: kompendium wiedzy*. Poznań: Quality Progress
- MacDUFFIE, J.P. 1997. The Road to „Root Cause”: Shop-Floor Problem-Solving at Three Auto Assembly Plants. *Management Science*, Vol. 43, No. 4, s.479-502
- McMANUS, K. 1999. Is quality dead? *IEE Solutions*, Vol. 31, No. 7, s.32-35
- MIKO, E. 2002. Chropowatość powierzchni frezowanych walcowo. *Przegląd Mechaniczny* 11/2002, s.30-36
- MITCHELL, E.R. 1999. *Application of the process variability reduction methodology on the C-17 Economic Order Quantity process*. [online] M.Sc. thesis, California State University [pobrano 29.06.2007] dostęp: <http://proquest.umi.com/pqdweb?index=0&did=732085181&SrchMode=1&sid=1&Fmt=14&VInst=PROD&VType=PQD&RQT=309&VName=PQD&TS=1250248247&clientId=48611>

- MITSUISHI, M., WARISAWA, S., HANAYAMA, R. 2001. Development of an Intelligent High-speed Machining Center. *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, Vol. 50, Issue 1, s.275-280
- MOEN, R.D., NOLAN, T.W., PROVOST, L.P. 1999. *Quality Improvement Through Planned Experimentation*. USA: McGraw-Hill
- MONTGOMERY, D.C. 1991. *Design and Analysis of Experiments*. New York: John Wiley & Sons
- NEAVE, H.R. 1997. There's nothing normal about SPC!. *Training for Quality*, Vol. 5, No. 3, s.106-111
- NEAVE, H.R., WHEELER, D.J. 1996. *Shewhart's Charts and the Probability Approach* [online]. [pobrano 27.11.2008] dostep: http://www.spcpress.com/pdf/Wheeler_Neave.pdf
- NIEDERLIŃSKI, A. 2000. *Regulowe systemy ekspertowe*. Gliwice: Wydawnictwo Pracowni Komputerowej Jacka Skalmierskiego
- NOLAN, T.W., PROVOST, L.P. 1990. Understanding Variation. *Quality Progress*, Vol. 23, No. 5, s.70-78
- NONTHALEERAK, P., HENDRY, L.C. 2006. Six Sigma: Literature review and key future research areas. *International Journal of Six Sigma and Competitive Advantage*, Vol. 2, No. 2, s.105-161
- OCZOŚ, K.E. 2002. Rozwój innowacyjnych technologii ubytkowego kształtowania materiałów. Cz. 1. Obróbka skrawaniem. *Mechanik* 8-9/2002, s.537-550
- OCZOŚ, K.E. 2004(a). Trendy rozwojowe narzędzi skrawających. Cz.1. *Mechanik* 1/2004, s.5-13
- OCZOŚ, K.E. 2004(b). Zwiększanie efektywności obrabiarek skrawających. Cz.1. *Mechanik* 2/2004, s.49-56
- OCZOŚ, K.E. 2004(c). Doskonalenie strategii chłodzenia i smarowania w procesach obróbkowych. *Mechanik* 10/2004, s.597-606
- OCZOŚ, K.E. 2005(a). Sposoby kształtowania ubytkowego. Klasyfikacja i terminologia. *Mechanik* 2/2005, s.57-59
- OCZOŚ, K.E. 2005(b). Obrabiarki skrawające - stan obecny na tle prognozy rozwoju. Cz.1. *Mechanik* 12/2005, s.973-983
- OCZOŚ, K.E. 2006. Obrabiarki skrawające - stan obecny na tle prognozy rozwoju. Cz.2. *Mechanik* 1/2006, s.28-35
- OKAFOR, A.C., ERTEKIN, Y.M. 2000. Derivation of machine tool error models and error compensation procedure for three axes vertical machining center using rigid body kinematics. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, Vol. 40, Issue 8, s.1199-1213
- OKES, D. 2002. Organize Your Quality Tool Belt. *Quality Progress*, Vol. 35, No. 7, s.25-29
- OKONIEWSKI, S. 1976. *Podstawy technologii mechanicznej*. Warszawa: Wydawnictwa Naukowo-Techniczne

- PARSONS, R.J. 1992. A Manager's Guide To Statistical Methods. *Industrial Engineering*, Vol. 24, No. 1, s.29-35
- PERRY, L., BARKER, N. 2006. Six Sigma in the service sector: a focus on non-normal data, *International Journal of Six Sigma and Competitive Advantage*, Vol. 2, No. 3, s.313-333
- PŁASKA, S. 2000. *Wprowadzenie do statystycznego sterowania procesami technologicznymi*. Lublin: Wydawnictwo Politechniki Lubelskiej
- POKOJSKI, J. 2004. Metoda case-based reasoning a model procesu projektowego i produktu w budowie maszyn. *Przegląd Mechaniczny* 6/2004, s.23-27
- POKOJSKI, J. 2005. *Systemy doradcze w projektowaniu maszyn*. Warszawa: Wydawnictwa Naukowo-Techniczne
- POLSKI KOMITET NORMALIZACYJNY. 1994. PN-ISO 3534-2:1994 *Statystyka. Statystyczne sterowanie jakością. Terminologia i symbole*. Warszawa: PKN
- POLSKI KOMITET NORMALIZACYJNY. 1996. PN-ISO 8258:1996. *Karty kontrolne Shewharta*. Warszawa: PKN
- POLSKI KOMITET NORMALIZACYJNY. 1998. PN-ISO 230-1:1998. *Przepisy badania obrabiarek - Dokładność geometryczna obrabiarek pracujących bez obciążenia lub w warunkach obróbki wykańczającej*. Warszawa: PKN
- POLSKI KOMITET NORMALIZACYJNY. 1999(a). PN-ISO 230-2:1999. *Przepisy badania obrabiarek - Wyznaczanie dokładności i powtarzalności pozycjonowania osi sterowanych numerycznie*. Warszawa: PKN
- POLSKI KOMITET NORMALIZACYJNY. 1999(b). PN-ISO 230-4:1999. *Przepisy badania obrabiarek - Badania okrągłości w obrabiarkach sterowanych numerycznie*. Warszawa: PKN
- POLSKI KOMITET NORMALIZACYJNY. 2001. PN-EN ISO 9004:2001. *Systemy zarządzania jakością. Wytyczne doskonalenia funkcjonowania*. Warszawa: PKN
- POLSKI KOMITET NORMALIZACYJNY. 2005. PKN-ISO/TR 10017:2005. *Wytyczne dotyczące technik statystycznych odnoszących się do ISO 9001:2000*. Warszawa: PKN
- POLSKI KOMITET NORMALIZACYJNY. 2006. PN-EN ISO 9000:2006. *Systemy zarządzania jakością. Podstawy i terminologia*. Warszawa: PKN
- Practical Process Improvement*. 2008. [online] [pobrano 27.11.2008]
dostęp: <http://www.ppiresults.com/about.php>
- PUTTRE, M. 1998. Virtual machining for trial runs. *Design News*, Vol. 53, No. 2, s.14
- PYZDEK, T. 2001. *The Six Sigma Handbook*. USA: McGraw-Hill
- QUINLAN, D.M. 1999. *Application of the 7-step Process Variability Reduction on the C-17 employee certification process*. [online] M.Sc. thesis, California State University [pobrano 14.08.2009] dostęp:
<http://proquest.umi.com/pqdweb?index=0&did=734300601&SrchMode=1&sid=3&Fmt=6&VInst=PROD&VType=PQD&RQT=309&VName=PQD&TS=1250249021&clientId=48611>

- RAMESH, R., MANNAN, M.A., POO, A.N. 2000(a). Error compensation in machine tools – a review. Part I: geometric, cutting-force induced and fixture-dependent errors. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, Vol. 40, Issue 9, s.1235-1256
- RAMESH, R., MANNAN, M.A., POO, A.N. 2000(b). Error compensation in machine tools – a review. Part II: thermal errors. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, Vol. 40, Issue 9, s.1257-1284
- ROHLEDER, T., SILVER, E. 1997. A tutorial on business process improvement. *Journal of Operations Management*, Vol. 15, s.139–154
- RUTKOWSKI, L. 2005. *Metody i techniki sztucznej inteligencji*. Warszawa: Wydawnictwo Naukowe PWN
- SANDERS, D., ROSS, B., COLEMAN, J. 2000. The Process Map. *Quality Engineering*, Vol. 11, No. 4, s.555-561
- SANTOS, G., BARBOSA, J. 2006. Qualifound – a modular tool developed for quality improvement in foundries. *Journal of Manufacturing Technology Management*, Vol. 17, No. 3, s.351-362
- SCHERKENBACH, W.W. 1991. *Deming's Road to Continual Improvement*. Knoxville, Tennessee: SPC Press
- SCHNEIDERMAN, A.M. 1998. Are There Limits to Total Quality Management? *Strategy & Business*, Second Quarter 1998, Issue 11, s.35-45
- SCHWENKE, H., KNAPP, W., HAITJEMA, H., WECKENMANN, A., SCHMITT, R., DELBRESSINE, F. 2008. Geometric error measurement and compensation of machines – An update. *CIRP Annals – Manufacturing Technology*, Vol. 57, Issue 2, s.660-675
- SENGE, P.M. 1994. *The Fifth Discipline: The Art and Practice of the Learning Organization*. New York: Doubleday Business
- SHEWHART, W.A. 1980. *Economic Control of Quality of Manufactured Product*. Milwaukee, WI: ASQ Quality Press
- SILVERSTEIN, D., SAMUEL, P., DeCARLO, N. 2009. *The Innovator's Toolkit: 50+ Techniques for Predictable and Sustainable Organic Growth*. Hoboken, NJ: John Wiley & Sons
- SKOCZYŃSKI, W. 2001. *Ocena własności obrabiarek na podstawie dokładności obróbki przedmiotów próbnych*. Wrocław: Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej
- SKOŁUD, B., KALINOWSKI, K., KRENCZYK, D., KAMPA, A., GOŁDA, G., DOBRZAŃSKA-DANIKIEWICZ, A. 2005. Systemy wspomagania decyzji w planowaniu i sterowaniu produkcją. *Przegląd Mechaniczny* 5/2005, s.20-30
- SMITH, G.F. 2000. Too Many Types Of Quality Problems. *Quality Progress*, Vol. 33, No. 4, s.43-49
- SNEE, R.D. 2003. Eight Essential Tools. *Quality Progress*, Vol. 36, No. 12, s.86-88
- SNEE, R.D., HOERL, R.W. 2003. *Leading Six Sigma. A Step-by-Step Guide Based on Experience With GE and Other Six Sigma Companies*. Upper Saddle River, New Jersey: FT Press

- STARZYŃSKA, B., HAMROL, A., NAJLEPSZY, Z. 2009. Nowa metoda doboru narzędzi jakości na potrzeby doskonalenia procesów wytwarzania. *Zarządzanie Przedsiębiorstwem* 2/2009, s.65-74
- STEINER, S.H., MacKAY, R.J. 2005. *Statistical Engineering: An Algorithm for Reducing Variation in Manufacturing Processes*. Milwaukee, WI: ASQ Quality Press
- STEINER, S.H., MacKAY, R.J., RAMBERG, J.S. 2008. An Overview of the Shainin System for Quality Improvement. *Quality Engineering*, Vol. 20, No. 1, s.6-19
- Stream Of Variation Analysis (SOVA)*. 2004. [online] [pobrano 9.04.2009] dostęp: <http://homepages.cae.wisc.edu/~darek/SVA.html>
- Stream Of Variation Modeling (SOVA)*. 2004. [online] [pobrano 9.04.2009] dostęp: <http://homepages.cae.wisc.edu/~darek/SVM.html>
- Stream Of Variation (SOVA) Research Roadmap*. 2004. [online] [pobrano 31.10.2008] dostęp: <http://homepages.cae.wisc.edu/~darek/roadmap.html>
- SUTTON, C. 2006. Get the Most Out of Six Sigma. *Quality Progress*, Vol. 45, No. 3, s.46-48
- SZADKOWSKI, J. 1994. Automatyzacja obróbki skrawaniem. W: H. KUNICKI., red. *Poradnik inżyniera: obróbka skrawaniem. Tom III*. Warszawa: Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, s.40-180
- SZATKOWSKI, K. 2008. *Przygotowanie produkcji*. Warszawa: Wydawnictwo Naukowe PWN SA
- SZKODA, J. 2004. *Sterowanie jakością procesów produkcyjnych. Teoria i praktyka*. Olsztyn: Wydawnictwo Uniwersytetu Warmińsko-Mazurskiego
- TAGUCHI, G., ELSAYED, E.A., HSIANG, T.C. 1989. *Quality Engineering in Production Systems*. USA: McGraw-Hill
- TAGUE, N.R. 2005. *The Quality Toolbox*. Milwaukee, WI: ASQ Quality Press
- THAWESAENGSKULTHAI, N. 2007. *Selecting Quality Management and Improvement Initiatives: Case studies of industries in Thailand*. [online] Ph.D. thesis, University of Nottingham [10.07.2008] dostęp: [http://etheses.nottingham.ac.uk/archive/00000298/01/Natcha%27s_thesis_V16_\(submit_etheses\).pdf](http://etheses.nottingham.ac.uk/archive/00000298/01/Natcha%27s_thesis_V16_(submit_etheses).pdf)
- THAWESAENGSKULTHAI, N., TANNOCK, J.D.T. 2008. Pay-off selection criteria for quality and improvement initiatives. *International Journal of Quality & Reliability Management*, Vol. 25, No. 4, s.366-382
- The ROI Alliance, LLC*. 2008. [online] [pobrano 14.02.2008] dostęp: <http://www.roi-ally.com/qis.htm>
- THOMPSON, J.R., KORONACKI, J. 1994. *Statystyczne sterowanie procesem. Metoda Deminga etapowej optymalizacji jakości*. Warszawa: Akademicka Oficyna Wydawnicza PLJ
- THOMPSON, J.R., KORONACKI, J., NIECKUŁA, J. 2005. *Techniki zarządzania jakością. Od Shewharta do metody Six Sigma*. Warszawa: Akademicka Oficyna Wydawnicza Exit

- THORNTON, A.C. 2004. *Variation Risk Management. Focusing Quality Improvements in Product Development and Production*. Hoboken, New Jersey: John Wiley & Sons
- TUKEY, J.W. 1980. We Need Both Exploratory and Confirmatory. *The American Statistician*, Vol. 34, No. 1, s.23-25
- UPTON, D.M., KIM, B. 1998. Alternative methods of learning and process improvement in manufacturing. *Journal of Operations Management*, Vol. 16, Issue 1, s.1-20
- VOELKEL, J.G. 2002. Something's Missing. *Quality Progress*, Vol. 35, No. 5, s.98-101
- wdp consulting*. 2007. [online] [pobrano 31.10.2007] dostęp: <http://www.wdpc.co.uk/>
- WHEELER, D.J. 1998. Answers to control-chart FAQs. *Quality*, Vol. 37, No. 9, s.25-28
- WHEELER, D.J. 1999. *Three Types of Action* [online]. [pobrano 27.11.2008] dostęp: <https://www.spcpress.com/pdf/ThreeTypesofAction.pdf>
- WHEELER, D.J. 2008. *Zrozumieć zmienność. Klucz do zarządzania chaosem*. Tłumaczenie: Katarzyna Kornicka. Wrocław: ProdPress.com
- WHEELER, D.J., CHAMBERS, D.S. 1992. *Understanding Statistical Process Control*. Knoxville: SPC Press
- WILHELM, R.G., SRINIVASAN, N., FARABAUGH, F., HOCKEN, R. 1997. Part Form Errors Predicted from Machine Tool Performance Measurements. *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, Vol. 46, Issue 1, s.471-474
- WOODALL, W.H. 2000. Controversies and Contradictions in Statistical Process Control. *Journal of Quality Technology*, Vol. 32, No. 4, s.341-350
- WOODALL, W.H., MONTGOMERY, D.C. 1999. Research Issues and Ideas in Statistical Process Control. *Journal of Quality Technology*, Vol. 31, No. 4, s.376-386
- YANG, S., YUAN, J., NI, J. 1997. Real-time cutting force induced error compensation on a turning center. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, Vol. 37, No. 11, s.1597-1610
- YAU, H.-T., TING, J.-Y., CHUANG, C.-M. 2004. NC simulation with dynamic errors due to high-speed motion. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 23, No. 7-8, s.577-585
- ZHOU, S., HUANG, Q., SHI, J. 2003. State Space Modeling of Dimensional Variation Propagation in Multistage Machining Process Using Differential Motion Vectors. *IEEE Transactions On Robotics And Automation*, Vol. 19, No.2, s.296-309
- ZHU, J. 2008. *Robust thermal error modeling and compensation for CNC machine tools*. [online] Ph.D. thesis, University of Michigan [pobrano 24.04.2009] dostęp: http://deepblue.lib.umich.edu/bitstream/2027.42/60857/1/zhujie_1.pdf
- ŻEBROWSKI, H. 2004. Charakterystyka ogólna i podstawowe pojęcia w obróbce skrawaniem narzędziami o zdefiniowanej geometrii ostrza. *W: H. ŻEBROWSKI, red. Techniki wytwarzania: obróbka wiórowa, ścierna, erozyjna*. Wrocław: Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, s.18-39

ZAŁĄCZNIK A

ZESTAWIENIE POTENCJALNYCH PRZYCZYŃ BŁĘDÓW OBRÓBKİ SKRAWANIEM

	spósb obróbkı	kategoria błędów	BŁĄD	PRZYCZYNA	kategoria przyczyn	ew. dodatkowe uwagi, podprzyczyny
	1	2	3	4	5	6
1	wszystkie sposoby obróbkı skrawaniem	błędy wymiarów	-	nierównoległość i nieprostokadłość dwóch lub więcej części obrabiarki	geometria i kinematyka	
2	wszystkie sposoby obróbkı skrawaniem	błędy wymiarów	-	niedokładność narzędzi kształtowych	geometria i kinematyka	
3	wszystkie sposoby obróbkı skrawaniem	błędy wymiarów	-	zużycie narzędzia	geometria i kinematyka	
4	wszystkie sposoby obróbkı skrawaniem	błędy wymiarów	-	narost na ostrzu narzędzia	geometria i kinematyka	
5	wszystkie sposoby obróbkı skrawaniem	błędy wymiarów	-	podatność elementów obrabiarki	geometria i kinematyka	
6	wszystkie sposoby obróbkı skrawaniem	błędy wymiarów	-	odkształcenia statyczne układu OUPN	geometria i kinematyka	
7	wszystkie sposoby obróbkı skrawaniem	błędy wymiarów	-	wzrost temperatury narzędzia prowadzący do zmiany jego wymiarów	oddziaływania cieplne	
8	wszystkie sposoby obróbkı skrawaniem	błędy wymiarów	-	rozszerzalność cieplna przedmiotu obrabianego	oddziaływania cieplne	Rozszerzalność cieplna przedmiotu obrabianego zależna jest od: wielkości naddatków obróbkowych; wymiarów, masy i własności materiału przedmiotów; intensywności chłodzenia.
9	wszystkie sposoby obróbkı skrawaniem	błędy wymiarów	długofalowe różnice wymiarów przedmiotów wykonywanych seryjnie	odkształcenia cieplne układu OUPN	oddziaływania cieplne	
10	wszystkie sposoby obróbkı skrawaniem	błędy wymiarów	-	niedokładność nastawienia obrabiarki	warunki procesu	
11	wszystkie sposoby obróbkı skrawaniem	błędy wymiarów	-	zmiany wartości naddatku obróbkowego	warunki procesu	
12	wszystkie sposoby obróbkı skrawaniem	błędy wymiarów	-	zmiany twardości materiału obrabianego	warunki procesu	

13	wszystkie sposoby obróbki skrawaniem	błędy kształtu	-	zmiennosc skoku na czesciach zwojowanych (gwintowanych) obrabiarki, np. na srubach pociagowych	geometria i kinematyka	Błędy tego rodzaju odwzorowują się na przedmiocie obrabianym lub zmieniają okresowo warunki obróbki, co pośrednio odbija się na dokładności obróbki.
14	wszystkie sposoby obróbki skrawaniem	błędy kształtu	-	nierownoleglosc i nieprostokatnosc dwuch lub wiecej czesci obrabiarki	geometria i kinematyka	
15	wszystkie sposoby obróbki skrawaniem	błędy kształtu	-	nierowna podatnosc przy roznych kierunkach dzialania obciazenia, powodujaca niejednakowe odkształcenia układu	geometria i kinematyka	Największy wpływ obserwuje się w przypadku istnienia siły wirującej (wiertarki, wiertarko-frezarki, niewyrównoważenie elementów wirujących tokarek, szlifierek itp.).
16	wszystkie sposoby obróbki skrawaniem	błędy kształtu	-	nieprostoliniowosc prowadnic loza obrabiarki	geometria i kinematyka	
17	wszystkie sposoby obróbki skrawaniem	błędy kształtu	-	nieprostoliniowosc suportow	geometria i kinematyka	
18	wszystkie sposoby obróbki skrawaniem	błędy kształtu	-	nieprostoliniowosc stolow	geometria i kinematyka	
19	wszystkie sposoby obróbki skrawaniem	błędy kształtu	-	nieprostoliniowosc innych elementow	geometria i kinematyka	
20	wszystkie sposoby obróbki skrawaniem	błędy kształtu	-	niedokladnosc wykonania wrzeciona	geometria i kinematyka	
21	wszystkie sposoby obróbki skrawaniem	błędy kształtu	-	nieokladnosc srub pociagowych i mechanizmow podzialowych	geometria i kinematyka	
22	wszystkie sposoby obróbki skrawaniem	błędy kształtu	-	geometryczna niedokladnosc przyrzadow i uchwytow	geometria i kinematyka	
23	wszystkie sposoby obróbki skrawaniem	błędy kształtu	-	niedokladnosc narzedzi ksztaltowych	geometria i kinematyka	
24	wszystkie sposoby obróbki skrawaniem	błędy kształtu	-	narost na ostrzu narzedzia	geometria i kinematyka	
25	wszystkie sposoby obróbki skrawaniem	błędy kształtu	-	podatnosc elementow obrabiarki	geometria i kinematyka	
26	wszystkie sposoby obróbki skrawaniem	błędy kształtu	-	niepoprawnosc montazu oraz luzy (zwlaszcza we wrzecienniku i prowadnicach) - podatnosc stykowa	geometria i kinematyka	
27	wszystkie sposoby obróbki skrawaniem	błędy kształtu	-	zuzycia zespolow roboczych obrabiarki - podatnosc stykowa	geometria i kinematyka	
28	wszystkie sposoby obróbki skrawaniem	błędy kształtu	-	niewlasciwy dobór przekrojow czesci skladowych uchwytow i przyrzadow - podatnosc uchwytow i przyrzadow	geometria i kinematyka	

29	wszystkie sposoby obróbki skrawaniem	błędy kształtu	-	nadmierna liczba styków - podatność stykowa uchwytów i przyrządów	geometria i kinematyka	
30	wszystkie sposoby obróbki skrawaniem	błędy kształtu	-	stosowanie zbyt dużych luzów - podatność stykowa uchwytów i przyrządów	geometria i kinematyka	
31	wszystkie sposoby obróbki skrawaniem	błędy kształtu	-	odkształcenia przedmiotu obrabianego wywołane siłami skrawania - podatność przedmiotu obrabianego	geometria i kinematyka	
32	wszystkie sposoby obróbki skrawaniem	błędy kształtu	-	odkształcenia przedmiotu obrabianego wywołane mocowaniem - podatność przedmiotu obrabianego	geometria i kinematyka	
33	wszystkie sposoby obróbki skrawaniem	błędy kształtu	-	nieodpowiednie przekroje trzonka lub korpusu narzędzia - sprężyste odkształcenia narzędzi - podatność narzędzi	geometria i kinematyka	
34	wszystkie sposoby obróbki skrawaniem	błędy kształtu	-	odkształcenia sprężyste układu konstrukcyjnego obrabiarki	geometria i kinematyka	
35	wszystkie sposoby obróbki skrawaniem	błędy kształtu	-	odkształcenia termiczne układu konstrukcyjnego obrabiarki	oddziaływania cieplne	
36	wszystkie sposoby obróbki skrawaniem	błędy kształtu	-	wzrost temperatury narzędzia prowadzący do zmiany jego wymiarów	oddziaływania cieplne	
37	wszystkie sposoby obróbki skrawaniem	błędy kształtu	-	nierównomierny naddatek na obróbkę, powodujący zmiany wartości składowych siły skrawania, a w efekcie zmiany odkształceń układu	warunki procesu	
38	wszystkie sposoby obróbki skrawaniem	błędy kształtu	-	nierównomierność twardości w przekroju poprzecznym półfabrykatu	warunki procesu	
39	wszystkie sposoby obróbki skrawaniem	błędy kształtu	-	nie zachowanie podziału na obróbkę zgrubną i wykańczającą oraz naprężenia własne w przedmiocie obrabianym	warunki procesu	
40	wszystkie sposoby obróbki skrawaniem	błędy kształtu	-	geometryczna niedokładność półfabrykatu	warunki procesu	
41	wszystkie sposoby obróbki skrawaniem	błędy kształtu	-	drżania względne narzędzia i przedmiotu o częstotliwości równej prędkości obrotowej i kilku jej harmonicznym	drżania	
42	wszystkie sposoby obróbki skrawaniem	błędy kształtu	wklęsłość	zbyt mała sztywność zespołów obrabiarki w stosunku do przedmiotu	geometria i kinematyka	
43	wszystkie sposoby obróbki skrawaniem	błędy kształtu	zbieżność	błędy pionu (obrabiarki)	geometria i kinematyka	

44	wszystkie sposoby obróbki skrawaniem	błędy kształtu	stożkowość	błędy pionu (obrabiarki)	geometria i kinematyka	
45	wszystkie sposoby obróbki skrawaniem	błędy kształtu	stożkowość lub hiperboidalność	nierównoległość osi wrzeciona do prowadnic łoża	geometria i kinematyka	
46	wszystkie sposoby obróbki skrawaniem	błędy kształtu	owalność	bicie wrzeciona	geometria i kinematyka	
47	wszystkie sposoby obróbki skrawaniem	błędy kształtu	np. błąd prostoliniowości, błąd okrągłości, stożkowość, beczkowość	drżania względne między narzędziem a przedmiotem podczas obróbki, powodowane składową zmienną siłą skrawania i napędu oraz niewyrównoważeniem elementów wirujących	drżania	
48	wszystkie sposoby obróbki skrawaniem	błędy kształtu	np. błąd prostoliniowości, błąd okrągłości, stożkowość, beczkowość	drżania względne między narzędziem a przedmiotem podczas obróbki, powodowane oddziaływaniami kinematycznymi obrabiarki wynikającymi z błędów jej geometrii	drżania	Błędy geometrii obrabiarki mogą być powodowane niedokładnościami wykonawczymi i montażowymi (np. biciem wrzeciona) oraz zużyciem poszczególnych zespołów konstrukcyjnych; np. błędy prostoliniowości prowadnic i ich zużycie, błędy zamocowania narzędzia i przedmiotu obrabianego, błędy ułożyskowania itp.
49	wszystkie sposoby obróbki skrawaniem	błędy położenia	-	geometryczna niedokładność półfabrykatu	warunki procesu	
50	wszystkie sposoby obróbki skrawaniem	błędy położenia	-	drżania względne narzędzia i przedmiotu o częstotliwości równej prędkości obrotowej i kilku jej harmonicznym	drżania	
51	wszystkie sposoby obróbki skrawaniem	błędy położenia	np. błąd równoległości, błąd prostopadłości, błąd współosiowości, przecinania się osi	błędy zamocowania przedmiotu	geometria i kinematyka	
52	wszystkie sposoby obróbki skrawaniem	błędy położenia	np. błąd równoległości, błąd prostopadłości, błąd współosiowości, przecinania się osi	błędy ułożyskowania wrzeciona	geometria i kinematyka	
53	wszystkie sposoby obróbki skrawaniem	błędy położenia	np. błąd równoległości, błąd prostopadłości, błąd	błędy prostoliniowości prowadnic	geometria i kinematyka	

		współosiowości, przecinania się osi			
--	--	---	--	--	--

54	wszystkie sposoby obróbki skrawaniem	błędy złożone położenia i kształtu	np. bicie promieniowe, bicie osiowe, błąd kształtu wyznaczonego zarysu	błędy zamocowania przedmiotu	geometria i kinematyka	
55	wszystkie sposoby obróbki skrawaniem	błędy złożone położenia i kształtu	np. bicie promieniowe, bicie osiowe, błąd kształtu wyznaczonego zarysu	błędy ułożyskowania wrzeciona	geometria i kinematyka	
56	wszystkie sposoby obróbki skrawaniem	błędy złożone położenia i kształtu	np. bicie promieniowe, bicie osiowe, błąd kształtu wyznaczonego zarysu	błędy prostoliniowości prowadnic	geometria i kinematyka	

57	wszystkie sposoby obróbki skrawaniem	błędy powierzchni	-	niedokładność narzędzi wymiarowych (wiertła, rozwiertaki, gwintowniki, przeciągacze itp.)	geometria i kinematyka	
58	wszystkie sposoby obróbki skrawaniem	błędy powierzchni	-	zużycie narzędzia	geometria i kinematyka	
59	wszystkie sposoby obróbki skrawaniem	błędy powierzchni	chropowatość	geometria i stan ostrza narzędzia	geometria i kinematyka	
60	wszystkie sposoby obróbki skrawaniem	błędy powierzchni	chropowatość	narost na ostrzu narzędzia	geometria i kinematyka	
61	wszystkie sposoby obróbki skrawaniem	błędy powierzchni	chropowatość	sprężysty powrót materiału zgniatanego przez siłę skrawania za pośrednictwem noża	geometria i kinematyka	
62	wszystkie sposoby obróbki skrawaniem	błędy powierzchni	chropowatość	plastyczne odkształcanie się materiałów w strefie skrawania	geometria i kinematyka	
63	wszystkie sposoby obróbki skrawaniem	błędy powierzchni	chropowatość	parametry obróbki (posuw)	warunki procesu	
64	wszystkie sposoby obróbki skrawaniem	błędy powierzchni	chropowatość	rodzaj cieczy chłodząco-smarującej	warunki procesu	
65	wszystkie sposoby obróbki skrawaniem	błędy powierzchni	chropowatość	rodzaj materiału obrabianego (mikrostrukturalne zmiany materiału obrabianego)	warunki procesu	

66	wszystkie sposoby obróbki skrawaniem	błędy powierzchni	chropowatość	właściwości mechaniczne materiału obrabianego	warunki procesu	
67	wszystkie sposoby obróbki skrawaniem	błędy powierzchni	chropowatość	skład chemiczny i struktura materiału obrabianego	warunki procesu	
68	wszystkie sposoby obróbki skrawaniem	błędy powierzchni	chropowatość	ośrodek, w którym odbywa się obróbka	warunki procesu	
69	wszystkie sposoby obróbki skrawaniem	błędy powierzchni	chropowatość	drżania (obco- i samowzbudne) towarzyszące skrawaniu	drżania	
70	wszystkie sposoby obróbki skrawaniem	błędy powierzchni	chropowatość	drżania względne narzędzia i przedmiotu o większej częstotliwości	drżania	
71	wszystkie sposoby obróbki skrawaniem	błędy powierzchni	chropowatość	drżania wymuszone niedokładnościami wykonania elementów obrabiarki	drżania	Zewnętrzne obciążenie zmienne działające na układ
72	wszystkie sposoby obróbki skrawaniem	błędy powierzchni	chropowatość	drżania wymuszone zużyciem elementów obrabiarki	drżania	Zewnętrzne obciążenie zmienne działające na układ
73	wszystkie sposoby obróbki skrawaniem	błędy powierzchni	chropowatość	drżania wymuszone nierównomiernością naddatku na obróbkę	drżania	Zewnętrzne obciążenie zmienne działające na układ
74	wszystkie sposoby obróbki skrawaniem	błędy powierzchni	chropowatość	drżania wymuszone nieciągłością powierzchni obrabianej	drżania	Zewnętrzne obciążenie zmienne działające na układ
75	wszystkie sposoby obróbki skrawaniem	błędy powierzchni	chropowatość	drżania wymuszone drżaniami zewnętrznymi przenoszonymi przez podłoże	drżania	Zewnętrzne obciążenie zmienne działające na układ
76	wszystkie sposoby obróbki skrawaniem	błędy powierzchni	chropowatość	drżania parametryczne wywołane zmianą parametrów układu technologicznego (np. sztywności, masy) podczas obróbki	drżania	
77	wszystkie sposoby obróbki skrawaniem	błędy powierzchni	chropowatość	utrata stabilności procesu skrawania - dominująca składowa drgań samowzbudnych	drżania	
78	wszystkie sposoby obróbki skrawaniem	błędy powierzchni	falistość	geometryczna niedokładność obrabiarki	geometria i kinematyka	Błędy geometryczne obrabiarki powodują falistość powierzchni obrobionej o dłuższej fali niż w przypadku drgań układu konstrukcyjnego.
79	wszystkie sposoby obróbki skrawaniem	błędy powierzchni	falistość	błędy pionu (obrabiarki)	geometria i kinematyka	
80	wszystkie sposoby obróbki skrawaniem	błędy powierzchni	falistość	nieprostoliniowość prowadnic łoża obrabiarki	geometria i kinematyka	
81	wszystkie sposoby obróbki skrawaniem	błędy powierzchni	falistość	zużycie prowadnic	geometria i kinematyka	
82	wszystkie sposoby obróbki skrawaniem	błędy powierzchni	falistość	uginanie się wrzecion	geometria i kinematyka	
83	wszystkie sposoby obróbki skrawaniem	błędy powierzchni	falistość	luzy w łożyskach	geometria i kinematyka	

84	wszystkie sposoby obróbki skrawaniem	błędy powierzchni	falistość	zbyt duże posuwy	warunki procesu	
85	wszystkie sposoby obróbki skrawaniem	błędy powierzchni	falistość	drgania względne narzędzia i przedmiotu (o częstości większej od prędkości obrotowej i kilku jej harmonicznym)	drgania	
86	wszystkie sposoby obróbki skrawaniem	błędy powierzchni	falistość	drgania względne między narzędziem a przedmiotem podczas obróbki, powodowane składową zmienną siły skrawania i napędu oraz niewyrównoważeniem elementów wirujących	drgania	
87	wszystkie sposoby obróbki skrawaniem	błędy powierzchni	falistość	drgania względne między narzędziem a przedmiotem podczas obróbki, powodowane oddziaływaniami kinematycznymi obrabiarki wynikającymi z błędów jej geometrii	drgania	Tego rodzaju błędy geometrii obrabiarki mogą być spowodowane niedokładnościami wykonawczymi i montażowymi (np. biciem wrzeciona) oraz zużyciem poszczególnych zespołów konstrukcyjnych.
88	wszystkie sposoby obróbki skrawaniem	błędy powierzchni	falistość	drgania (obco- i samowzbudne)	drgania	
89	wszystkie sposoby obróbki skrawaniem	błędy powierzchni	falistość	utrata stabilności procesu skrawania - dominująca składowa drgań samowzbudnych	drgania	
90	wszystkie sposoby obróbki skrawaniem	błędy powierzchni	falistość	pojedynczy impuls naruszający stan równowagi - drgania swobodne	drgania	
91	wszystkie sposoby obróbki skrawaniem	błędy powierzchni	falistość (faliste ślady ostrza narzędzia na obrobionej powierzchni)	nieodpowiednia geometria narzędzia i/lub kinematyka skrawania	geometria i kinematyka	
92	wszystkie sposoby obróbki skrawaniem	błędy powierzchni	falistość (faliste ślady ostrza narzędzia na obrobionej powierzchni)	zmiennosc sił tarcia między powierzchniami narzędzia i przedmiotu obrabianego - drgania samowzbudne	drgania	
93	wszystkie sposoby obróbki skrawaniem (zwłaszcza w obrabiarkach sterowanych numerycznie)	błędy położenia	np. błąd równoległości, błąd prostokątności, błąd współosiowości, przecinania się osi	błędy realizacji ruchów posuwowych	geometria i kinematyka	
94	wszystkie sposoby obróbki skrawaniem (zwłaszcza w obrabiarkach sterowanych numerycznie)	błędy złożone położenia i kształtu	np. bicie promieniowe, bicie osiowe, błąd kształtu wyznaczonego zarysu	błędy realizacji ruchów posuwowych	geometria i kinematyka	

95	toczenie	błędy wymiaru	odchylenie od średnicy nominalnej	niewspółosiowość osi stereometrycznych i osi obrotu	geometria i kinematyka	
96	toczenie	błędy kształtu	nieokrągłość	niedokładność skojarzenia kiel-nakiełek	geometria i kinematyka	
97	toczenie	błędy kształtu	nieokrągłość	nieokrągłość trajektorii osi wrzeciona i konika	geometria i kinematyka	
98	toczenie	błędy kształtu	nieokrągłość	odkształcenia od sił mocowania	geometria i kinematyka	
99	toczenie	błędy kształtu	nieokrągłość	wahania zmienności promieniowej od sił niewyrównoważenia	geometria i kinematyka	
100	toczenie	błędy kształtu	nieokrągłość	błąd kołowości i walcowości oraz bicie promieniowe i osiowe części obrotowych	geometria i kinematyka	
101	toczenie	błędy kształtu	nieokrągłość	niejednakowa odkształcalność cieplna nieregularnie ukształtowanego przedmiotu	oddziaływania cieplne	
102	toczenie	błędy kształtu	nieokrągłość	błędy półwyrobu	warunki procesu	
103	toczenie	błędy kształtu	niewalcowość	nierównoległość ruchu suportu do osi wrzeciona	geometria i kinematyka	
104	toczenie	błędy kształtu	niewalcowość	odkształcenia od sił mocowania	geometria i kinematyka	
105	toczenie	błędy kształtu	niewalcowość	odkształcenia spowodowane ciężarem własnym	geometria i kinematyka	
106	toczenie	błędy kształtu	niewalcowość	odkształcenia przedmiotu i obrabiarki od sił skrawania	geometria i kinematyka	
107	toczenie	błędy kształtu	niewalcowość	stępienie narzędzia	geometria i kinematyka	
108	toczenie	błędy kształtu	niewalcowość	błąd kołowości i walcowości oraz bicie promieniowe i osiowe części obrotowych	geometria i kinematyka	
109	toczenie	błędy kształtu	niewalcowość	odkształcenia cieplne przewodnic	oddziaływania cieplne	
110	toczenie	błędy kształtu	niewalcowość	odkształcenia cieplne przedmiotu i narzędzia	oddziaływania cieplne	
111	toczenie	błędy kształtu	niewalcowość - stożkowość	zużycie narzędzia	geometria i kinematyka	
112	toczenie	błędy kształtu	niewalcowość - stożkowatość	niewspółosiowość osi stereometrycznych i osi obrotu	geometria i kinematyka	
113	toczenie (wałka)	błędy kształtu	niewalcowość - beczkowatość	podatność przedmiotu jest większa od podatności wrzeciona i konika	geometria i kinematyka	
114	toczenie (wałka)	błędy kształtu	niewalcowość - wklęsłość-zwężkowość	podatność przedmiotu jest mniejsza od podatności wrzeciona i konika	geometria i kinematyka	
115	toczenie	błędy kształtu	niepłaskość czola	zmienność poosiowa wrzeciona	geometria i kinematyka	
116	toczenie	błędy kształtu	niepłaskość czola	nieprostoliniowość i nieprostokątność ruchu suportu poprzecznego	geometria i kinematyka	
117	toczenie	błędy kształtu	niepłaskość czola	błąd ustawienia przedmiotu	geometria i kinematyka	
118	toczenie	błędy kształtu	niepłaskość czola	odkształcenia od ciężaru własnego	geometria i kinematyka	
119	toczenie	błędy kształtu	niepłaskość czola	zmiana kierunku ruchu suportu poprzecznego z powodu odkształceń cieplnych	oddziaływania cieplne	

120	toczenie	błędy położenia	niewspółosiowość	wahania zmienności promieniowej od sił niewyrównoważenia i w zależności od obrotów	geometria i kinematyka	
121	toczenie	błędy położenia	niewspółosiowość	błąd ustawienia przedmiotu	geometria i kinematyka	
122	toczenie	błędy położenia	niewspółosiowość	błędy półwyrobu	warunki procesu	
123	toczenie - obróbka w kłach	błędy kształtu	nieokrągłość	odchylenia trajektorii ruchu osi przedmiotu od okręgu spowodowane nieprawidłowym ruchem osi kła konika (w przypadku stosowania kła obrotowego)	geometria i kinematyka	
124	toczenie - obróbka w kłach	błędy kształtu	nieokrągłość	odkształcenia przedmiotu obrabianego od siły spowodowanej niewyrównoważeniem	geometria i kinematyka	Wpływ tej siły przejawia się w chwilowym sumowaniu z pozostałymi siłami, co powoduje zmiany ugięcia przedmiotu w czasie obrotu. Siła ta ma źródło w nierównomiernym rozłożeniu masy przedmiotu względem jego osi obrotu. Jest to siła wirująca, skierowana promieniowo.
125	toczenie - obróbka w kłach	błędy kształtu	nieokrągłość	odchylenia trajektorii ruchu osi przedmiotu od okręgu spowodowane nierównomiernym naddatkiem powodującym zmienność sił skrawania podczas jednego obrotu przedmiotu	warunki procesu	Wpływ zauważalny głównie przy obróbce przedmiotów surowych, z dużymi błędami kształtu - wtedy mogą wystąpić duże wahania siły skrawania powodujące znaczną owalność.
126	toczenie - obróbka w kłach	błędy kształtu	nieokrągłość - błędy kształtu nakielka odwzorowane na powierzchni obrabianej (głównie w okolicy kła stałego konika)	odchylenia trajektorii ruchu osi przedmiotu od okręgu spowodowane niedokładnością współdziałania kła z nakielkiem (ma znaczenie w przypadkach, gdzie występuje względny ruch kła i nakielka)	geometria i kinematyka	Nieunikniona niewspółosiowość nakielków (przy względnym obrocie kła i nakielka oraz istnieniu sił promieniowych).
127	toczenie - obróbka w kłach	błędy kształtu	niewalcowość	nieprostoliniowość ruchu suportu	geometria i kinematyka	Nieprostoliniowość prowadnic suportu wzdłużnego - wstępna oraz spowodowana stopniowym zużyciem prowadnic w czasie eksploatacji (szybkość tego zużycia zależy m.in. od rodzaju materiału prowadnic i jego twardości, obciążenia, prędkości ruchu, rodzaju smarowania, rodzaju materiału obrabianego). Prostoliniowość prowadnic może się też zmieniać z powodu zmian temperatury, wywołujących ich wygięcie w zależności od kształtu i rozłożenia masy łoża.

128	toczenie - obróbka w kłach	błędy kształtu	niewalcowość	nierównoległość ruchu suportu do osi obrotu przedmiotu	geometria i kinematyka	Ruch noża ustawionego na wysokości osi przedmiotu obrabianego powinien być równoległy do osi kłów. Szczególnie duży wpływ na nierównoległość ruchu suportu i osi przedmiotu podczas obróbki mają podatność wrzeciona i konika. Wzajemne przemieszczenie kłów może nastąpić także w wyniku zmiany stanu cieplnego obrabiarki, od zewnętrznych lub wewnętrznych źródeł ciepła.
129	toczenie - obróbka w kłach	błędy kształtu	niewalcowość	zmiennosć promieniowa kła wrzeciona i ewentualnie stosowanego kła obrotowego konika	geometria i kinematyka	Wpływ zmienności promieniowej zmienia się ze zmianą prędkości obrotowej (jej wzrost powoduje zmniejszenie podatności wrzeciona, a tym samym zmniejszenie jego ugięcia). Tak więc "usztywnienie" wrzeciona przeciwdziała częściowo wpływowi wzrastających wraz z prędkością obrotową sił dynamicznych.
130	toczenie - obróbka w kłach	błędy kształtu	niewalcowość	odkształcenia obrabiarki pod działaniem sił skrawania, mocowania i ciężaru przyrządów oraz przedmiotu	geometria i kinematyka	
131	toczenie - obróbka w kłach	błędy kształtu	niewalcowość	odkształcenia przedmiotu obrabianego od sił mocujących	geometria i kinematyka	
132	toczenie - obróbka w kłach	błędy kształtu	niewalcowość	odkształcenia przedmiotu obrabianego od siły spowodowanej niewyrównoważeniem	geometria i kinematyka	Wpływ tej siły przejawia się w chwilowym sumowaniu z pozostałymi siłami, co powoduje zmiany ugięcia przedmiotu w czasie obrotu. Siła ta ma źródło w nierównomiernym rozłożeniu masy przedmiotu względem jego osi obrotu. Jest to siła wirująca, skierowana promieniowo.
133	toczenie - obróbka w kłach	błędy kształtu	niewalcowość	odkształcenia cieplne układu OPNP	oddziaływania cieplne	
134	toczenie - obróbka w kłach	błędy kształtu	niewalcowość - nieprostoliniowość tworzącej	nierównoległość ruchu suportu do osi obrotu przedmiotu w płaszczyźnie pionowej i poziomej - przesunięcie osi w płaszczyźnie pionowej	geometria i kinematyka	Ruch noża ustawionego na wysokości osi przedmiotu obrabianego powinien być równoległy do osi kłów. Kiel konika może być przesunięty względem kła wrzeciona w płaszczyźnie pionowej i poziomej, z powodu: nierównoległości prowadnic suportu i konika, ich zużycia, odkształceń cieplnych, podatności obu kłów.

135	toczenie - obróbka w kłach	błędy kształtu	niewalcowość - stożkowość	nierównoległość ruchu suportu do osi obrotu przedmiotu w płaszczyźnie pionowej i poziomej - przesunięcie osi w płaszczyźnie poziomej	geometria i kinematyka	Ruch noża ustawionego na wysokości osi przedmiotu obrabianego powinien być równoległy do osi kłów. Kieł konika może być przesunięty względem kła wrzeciona w płaszczyźnie pionowej i poziomej, z powodu: nierównoległości prowadnic suportu i konika, ich zużycia, odkształceń cieplnych, podatności obu kłów.
136	toczenie - obróbka w kłach	błędy kształtu	niewalcowość - stożkowość	zużycie narzędzia	geometria i kinematyka	Zużycie narzędzia bezpośrednio wpływa na powstanie stożkowości przedmiotu i dodatkowo zwiększa siłę skrawania.
137	toczenie - obróbka w kłach	błędy kształtu	niewalcowość - średnica największa na środku przedmiotu i malejąca ku jego krańcom	odkształcenia przedmiotu obrabianego od ciężaru własnego	geometria i kinematyka	Wynikiem działania siły ciężkości jest powiększenie średnicy przedmiotu największe w środku i malejące ku krańcom.
138	toczenie - obróbka w kłach	błędy kształtu	niewalcowość - średnica największa na środku przedmiotu i malejąca ku jego krańcom	odkształcenia przedmiotu obrabianego od sił skrawania	geometria i kinematyka	Względne odsunięcie przedmiotu i narzędzia powoduje zwiększenie średnicy obrabianej powierzchni (jest ono największe w środku przedmiotu, gdzie jego podatność jest największa).
139	toczenie - obróbka w kłach	błędy położenia	niewspółosiowość	zmiennność promieniowa kłów wrzeciona i konika	geometria i kinematyka	
140	toczenie - obróbka w kłach	błędy położenia	nieprostokątność powierzchni czołowej	zmiennność osiowa wrzeciona - jest przyczyną równej co do wartości nieprostokątności czoła	geometria i kinematyka	
141	toczenie - obróbka w kłach	błędy położenia i błędy kształtu	niepłaskość i nieprostokątność powierzchni czołowej	nieprostokątność kierunku przesuwu suportu poprzecznego do kierunku przesuwu suportu wzdłużnego i nieprostoliniowość ruchu suportu poprzecznego	geometria i kinematyka	Do zmian wzajemnego położenia prowadnic suportów wzdłużnego i poprzecznego (a więc błędów nieprostokątności) prowadzić może także odkształcenie i zużycie prowadnic wzdłużnych.
142	toczenie - obróbka w kłach - zamocowanie na kle stałym w koniku	błędy kształtu	nieokrągłość - odchyłki malejące w kierunku konika	odchylenia trajektorii ruchu osi przedmiotu od okręgu spowodowane odchyleniami toru ruchu osi końcówki wrzeciona od okręgu	geometria i kinematyka	Wpływ na kształt toru ruchu osi końcówki wrzeciona mają: nieuniknione luzy i błędy kształtu części współdziałających w łożyskach wrzeciona (najczęściej bieżnie łożysk wykazują błędy kształtu), różna podatność wrzeciona w zależności od kierunku działania siły (m.in. spowodowana niesymetrią korpusu wrzeciennika względem osi wrzeciona oraz niesymetrycznym działaniem sił od kół zębatach, co powoduje że siły działające na wrzeciono promieniowo pod różnymi kątami powodują różne jego ugięcia).

143	toczenie - obróbka w kłach - zamocowanie na kle stałym w koniku	błędy kształtu	stożkowość	kieł stały konika przesunięty względem kierunku ruchu suportu w poziomie (kieł wrzeciona współosiowy z osią obrotu wrzeciona)	geometria i kinematyka	
144	toczenie - obróbka w kłach - zamocowanie na kle stałym w koniku	błędy kształtu	powierzchnia umowna ma kształt hyperboloidy	kieł stały konika przesunięty względem kierunku ruchu suportu w pionie (kieł wrzeciona współosiowy z osią obrotu wrzeciona)	geometria i kinematyka	
145	toczenie - obróbka w kłach - zamocowanie na kle stałym w koniku	błędy położenia	niewspółosiowość - mimośrodowość, pochylenie osi	zmiennosc promieniowa kła wrzeciona (oś obrotu kła stałego konika równoległa do ruchu suportu)	geometria i kinematyka	Błędy te mogą wystąpić gdy przy zmianie mocowania nastąpi obrót przedmiotu o 180 stopni wokół osi.
146	toczenie - obróbka w kłach - zamocowanie na kle stałym w koniku	błędy położenia i błędy kształtu	niewspółosiowość - mimośrodowość, stożkowość	zmiennosc promieniowa kła wrzeciona oraz kieł stały konika przesunięty względem kierunku ruchu suportu w poziomie	geometria i kinematyka	Błędy te mogą wystąpić gdy przy zmianie mocowania nastąpi obrót przedmiotu o 180 stopni wokół osi.
147	toczenie - obróbka w kłach - zamocowanie na kle stałym w koniku	błędy położenia i błędy kształtu	niewspółosiowość - pochylenie osi oraz powierzchnia umowna ma kształt hyperboloidy	zmiennosc promieniowa kła wrzeciona oraz kieł stały konika przesunięty względem kierunku ruchu suportu w pionie	geometria i kinematyka	Błędy te mogą wystąpić gdy przy zmianie mocowania nastąpi obrót przedmiotu o 180 stopni wokół osi.
148	toczenie - obróbka w kłach - podparcie przedmiotu kłem obrotowym w koniku	błędy kształtu	nieokrągłość - znaczne zwiększenie błędów okrągłości przy koniku	odchylenia trajektorii ruchu osi przedmiotu od okręgu spowodowane odchyleniami toru ruchu osi końcówki wrzeciona od okręgu	geometria i kinematyka	Wpływ na kształt toru ruchu osi końcówki wrzeciona mają: nieuniknione luzy i błędy kształtu części współdziałających w łożyskach wrzeciona (najczęściej bieżnie łożysk wykazują błędy kształtu), różna podatność wrzeciona w zależności od kierunku działania siły (m.in. spowodowana niesymetrią korpusu wrzeciennika względem osi wrzeciona oraz niesymetrycznym działaniem sił od kół zębatach, co powoduje że siły działające na wrzeciono promieniowo pod różnymi kątami powodują różne jego ugięcia).
149	toczenie - obróbka w kłach - podparcie przedmiotu kłem obrotowym w koniku	błędy położenia i błędy kształtu	niewspółosiowość - mimośrodowość, pochylenie osi oraz powierzchnia umowna ma kształt złożony	zmiennosc promieniowa kła wrzeciona oraz zmiennosc promieniowa kła obrotowego konika	geometria i kinematyka	Wartość mimośrodowości lub pochylenia osi zależy od stosunku wartości zmiennosci promieniowej kłków i zgodności ich ruchu w zależności od kąta obrotu.
150	toczenie - toczenie w uchwycie z podparciem kłem	błędy kształtu	nieokrągłość	istotne ugięcie końcówki wrzeciona na skutek zastosowania uchwytu (znacznie cięższego niż tarcza zabierakowa i zabierak)	geometria i kinematyka	
151	toczenie - toczenie w uchwycie z podparciem kłem	błędy kształtu	nieokrągłość	siły spowodowane niewyrównoważeniem elementów wirujących	geometria i kinematyka	Niewyrównoważenie może być spowodowane samą konstrukcją uchwytu oraz niewspółosiowością zamocowania przedmiotu w uchwycie.

152	toczenie - toczenie w uchwycie z podparciem kłem	błędy kształtu	nieokrągłość	odchylenia trajektorii ruchu osi przedmiotu od okręgu spowodowane nierównomiernym naddatkiem powodującym zmienność sił skrawania podczas jednego obrotu przedmiotu	warunki procesu	
153	toczenie - toczenie w uchwycie z podparciem kłem	błędy kształtu	nieokrągłość - błąd wielolukowości przedmiotu	zmiany podatności mocowania przedmiotu w uchwycie (wywołane zmiennym kierunkiem działania siły skrawania w stosunku do szczęk), a tym samym zmiany jego ugięcia, którego wartość zmienia się trzykrotnie podczas jednego obrotu	geometria i kinematyka	
154	toczenie - toczenie w uchwycie z podparciem kłem	błędy kształtu	niewalcowość - największe ugięcie wystąpi bliżej końca podpartego kłem (odpowiednio mniejsze będzie więc powiększenie średnicy przedmiotu w środku jego długości)	odkształcenia przedmiotu obrabianego od ciężaru własnego	geometria i kinematyka	W stosunku do obróbki w kłach tu mocowanie jest sztywniejsze, a więc ugięcia są mniejsze.
155	toczenie - toczenie w uchwycie z podparciem kłem	błędy kształtu	niewalcowość - największe ugięcie wystąpi bliżej końca podpartego kłem (odpowiednio mniejsze będzie więc powiększenie średnicy przedmiotu w środku jego długości)	odkształcenia przedmiotu obrabianego od sił skrawania	geometria i kinematyka	W stosunku do obróbki w kłach tu mocowanie jest sztywniejsze, a więc ugięcia są mniejsze.
156	toczenie - toczenie w uchwycie z podparciem kłem	błędy położenia	niewspółosiowość	zmienność promieniowa kła konika	geometria i kinematyka	
157	toczenie - toczenie w uchwycie z podparciem kłem	błędy położenia i błędy kształtu	niepłaskość i nieprostokątność powierzchni czołowej	zmienność poosiowa wrzeciona i uchwytu	geometria i kinematyka	
158	toczenie - toczenie w uchwycie z podparciem kłem	błędy położenia i błędy kształtu	niepłaskość i nieprostokątność powierzchni czołowej	nieprostokątność kierunku przesuwu suportu poprzecznego do kierunku przesuwu suportu wzdłużnego i nieprostoliniowość ruchu suportu poprzecznego	geometria i kinematyka	Do zmian wzajemnego położenia prowadnic suportów wzdłużnego i poprzecznego (a więc błędów nieprostokątności) prowadzić może także odkształcenie i zużycie prowadnic wzdłużnych.

159	toczenie - toczenie w uchwycie z podparciem kłem - obróbka w dwóch zamocowaniach	błędy położenia	niewspółosiowość - mimośrodowość i pochylenie osi (zazwyczaj jednocześnie)	nieodpowiednia jakość przyrządu oraz niestaranność ustawienia przedmiotu	geometria i kinematyka	
160	toczenie - toczenie w uchwycie z podparciem kłem stałym	błędy kształtu	błędy okrągłości - największe przy wrzecionie, malejące w kierunku konika	wpływ bicia uchwytu/wrzeciona	geometria i kinematyka	
161	toczenie - toczenie w uchwycie z podparciem kłem obrotowym	błędy kształtu	błędy okrągłości - nakładające się z błędami wywołanymi trajektorią kła obrotowego	wpływ bicia uchwytu/wrzeciona oraz bicia kła obrotowego	geometria i kinematyka	
162	toczenie - toczenie w uchwycie bez podparcia kłem	błędy kształtu	nieokrągłość	wpływ bicia uchwytu/wrzeciona	geometria i kinematyka	
163	toczenie - toczenie w uchwycie bez podparcia kłem	błędy kształtu	nieokrągłość	istotne ugięcie końcówki wrzeciona na skutek zastosowania uchwytu (znacznie cięższego niż tarcza zabierakowa i zabierak)	geometria i kinematyka	
164	toczenie - toczenie w uchwycie bez podparcia kłem	błędy kształtu	nieokrągłość	siły spowodowane niewyrównoważeniem elementów wirujących	geometria i kinematyka	Niewyrównoważenie może być spowodowane samą konstrukcją uchwytu oraz niewspółosiowością zamocowania przedmiotu w uchwycie.
165	toczenie - toczenie w uchwycie bez podparcia kłem	błędy kształtu	nieokrągłość	odchylenia trajektorii ruchu osi przedmiotu od okręgu spowodowane nierównomiernym nadładkiem powodującym zmienność sił skrawania podczas jednego obrotu przedmiotu	warunki procesu	
166	toczenie - toczenie w uchwycie bez podparcia kłem	błędy kształtu	nieokrągłość - błąd wielokukowości przedmiotu	zmiany podatności mocowania przedmiotu w uchwycie (wywołane zmiennym kierunkiem działania siły skrawania w stosunku do szczęk), a tym samym zmiany jego ugięcia, którego wartość zmienia się trzykrotnie podczas jednego obrotu	geometria i kinematyka	
167	toczenie - toczenie w uchwycie bez podparcia kłem	błędy kształtu	niewalcowość	wpływ błędów uchwytu/wrzeciona oraz ugięcia przedmiotu	geometria i kinematyka	Ugięcie przedmiotu jest największe na swobodnym końcu. Przedmiot zamocowany tylko w uchwycie traktować można jako przedłużenie wrzeciona, przez co staje się ono mniej sztywne. Ponadto, następuje w tym przypadku zmniejszenie ugięcia wrzeciona ze zwiększeniem obrotów.

168	toczenie - toczenie w uchwycie bez podparcia kłem	błędy położenia	niewspółosiowość - pochylenie osi	nieprawidłowe zamocowanie przedmiotu, z pochyleniem jego osi względem osi obrotu przedmiotu, np. z powodu błędu półwyrobu (zwłaszcza surowego) lub szczęk	geometria i kinematyka	
169	toczenie - toczenie w uchwycie bez podparcia kłem	błędy położenia	niewspółosiowość - mimośrodowość osi	zmiennosc promieniowa wrzeciona (powstała mimośrodowość jest jej równa co do wartości)	geometria i kinematyka	
170	toczenie - toczenie w uchwycie bez podparcia kłem - obróbka tarcz (zastosowanie wewnętrznych szczęk uchwytu)	błędy kształtu	niepłaskość tarczy	ugięcie narzędzia oraz przedmiotu, wskutek działania siły skrawania	geometria i kinematyka	Ze względu na płaskość powierzchni, bardziej korzystna jest obróbka od obwodu do środka tarczy.
171	toczenie - toczenie w uchwycie bez podparcia kłem - obróbka tarcz (zastosowanie wewnętrznych szczęk uchwytu) - obróbka jednej powierzchni	błędy położenia	nieprostokątność powierzchni tarczy do osi obrotu - nieprostokątność powierzchni czołowej do powierzchni bocznej tarczy	zmiennosc poosiowa uchwytu	geometria i kinematyka	
172	toczenie - toczenie w uchwycie bez podparcia kłem - obróbka tarcz (zastosowanie wewnętrznych szczęk uchwytu) - obróbka obu stron	błędy położenia	nieprostokątność powierzchni tarczy do osi obrotu - nieprostokątność powierzchni czołowej do powierzchni bocznej tarczy oraz nierównoległość powierzchni	zmiennosc poosiowa uchwytu	geometria i kinematyka	
173	toczenie - toczenie w uchwycie bez podparcia kłem - obróbka tarcz (zastosowanie wewnętrznych szczęk uchwytu) - obróbka obu stron	błędy położenia	nieprostokątność powierzchni tarczy do osi obrotu - nieprostokątność powierzchni czołowej do powierzchni bocznej tarczy oraz nierównoległość powierzchni	błąd ustawienia przedmiotu w szczękach	geometria i kinematyka	

174	toczenie - wytaczanie otworów	błędy wymiaru	zwiększenie wymiaru obrabianego otworu	rozszerzanie przedmiotu i narzędzia, spowodowane ciepłem skrawania, którego odprowadzanie jest dużo gorsze [niż w innych typach obróbki]	oddziaływania cieplne	
175	toczenie - wytaczanie otworów	błędy kształtu	nieokrągłość	odkształcenia przedmiotu od sił skrawania	geometria i kinematyka	Wartość odkształcenia przedmiotu zależy od liczby punktów mocowania, wielkości promienia szczęki uchwytu i promienia powierzchni mocującej przedmiotu (promienie te powinny być sobie równe, gdyż każda różnica powoduje zwiększenie odkształceń) oraz szerokości szczęki. Wielkość odkształceń od sił mocowania zmienia się wzdłuż osi przedmiotu.
176	toczenie - wytaczanie otworów	błędy kształtu	niewalцовość otworu	ugięcie narzędzia (większe niż w innych typach obróbki, z uwagi na jego mniejszy przekrój przy jednocześnie większym wysięgu)	geometria i kinematyka	Duża podatność narzędzia może powodować także jego drgania.
177	toczenie: obróbka długich otworów o małej średnicy	błędy kształtu	-	brak podparcia narzędzi do obróbki długich otworów o małej średnicy, przyczyniający się do sprężystego odkształcenia narzędzi	geometria i kinematyka	
178	toczenie - wytaczanie otworów - utwierdzenie bez podparcia	błędy kształtu	niewalцовość - otwór stożkowy	ugięcie zespołu wrzeciono-narzędzie (zależne od wysięgu wrzeciona i obciążenia)	geometria i kinematyka	Wielkość ugięcia wrzeciona zależy jest ponadto od wzajemnego stosunku sił skrawania, a szczególnie od stosunku siły stycznej i promieniowej.
179	toczenie - wytaczanie otworów - utwierdzenie z podparciem (zastosowanie podtrzymki)	błędy kształtu	niewalцовość - otwór zwężkowy	ugięcie zespołu wrzeciono-wytaczadło (zależne od wysięgu wrzeciona i obciążenia)	geometria i kinematyka	Wielkość ugięcia wrzeciona zależy jest ponadto od wzajemnego stosunku sił skrawania, a szczególnie od stosunku siły stycznej i promieniowej.
180	toczenie powierzchni czołowej	błędy kształtu	niepłaskość powierzchni czołowej	osiowa podatność wrzeciona	geometria i kinematyka	Siła skrawania przy toczeniu powierzchni czołowej zmienia się z promieniem toczenia.
181	toczenie - obróbka płaszczyzn i zewnętrznych powierzchni obrotowych	błędy powierzchni	faliistość	błąd kołowości i walцовości oraz bicie promieniowe i osiowe części obrotowych	geometria i kinematyka	
182	frezowanie	błędy wymiarów	-	mimośrodowość krawędzi skrawających w stosunku do uchwytu (bicie ostrzy)	geometria i kinematyka	
183	frezowanie	błędy wymiarów i błędy powierzchni	-	mimośrodowość krawędzi skrawających w stosunku do uchwytu (bicie ostrzy) oraz nierównomierne zużycie ostrzy	geometria i kinematyka	

184	frezowanie	błędy kształtu	-	błędy trajektorii osi wrzeciona	geometria i kinematyka	Przyczynami błędów trajektorii osi wrzeciona mogą być: luzy napędów osi maszyny, niesynchronizowanie napędów osi, niedokładność elementów łożyskowania wrzeciona, wpływ zmienności podatności wrzeciona wraz z kierunkiem działania siły, nierównomierne naddatki.
185	frezowanie	błędy kształtu	niepłaskość	nieprostoliniowość ruchu przedmiotu w płaszczyźnie prostopadłej do powierzchni obrabianej	geometria i kinematyka	Nieprostoliniowość ta jest spowodowana odchyłkami od prostoliniowości ruchu stołu w tej płaszczyźnie i odwzorowuje się na powierzchni przedmiotu.
186	frezowanie	błędy kształtu	niepłaskość	nieprostokątność osi wrzeciona do stołu, powodująca pochylenie powierzchni freza	geometria i kinematyka	
187	frezowanie	błędy kształtu	niepłaskość	odkształcenie uchwytu freza od ciężaru własnego i ciężaru freza	geometria i kinematyka	
188	frezowanie	błędy kształtu	niepłaskość	odkształcenie przedmiotu i obrabiarki spowodowane siłami skrawania	geometria i kinematyka	
189	frezowanie	błędy kształtu	niepłaskość	odkształcenia spowodowane niewyrównoważeniem freza	geometria i kinematyka	
190	frezowanie	błędy kształtu	niepłaskość	odkształcenia cieplne obrabiarki i przedmiotu	oddziaływania cieplne	
191	frezowanie	błędy kształtu	niepłaskość	niepłaskość półwyrobu	warunki procesu	
192	frezowanie	błędy położenia	-	błędy nastawienia obrabiarki	warunki procesu	
193	frezowanie	błędy położenia	nierównoległość do podstawy	odkształcenie przedmiotu i obrabiarki spowodowane siłami skrawania	geometria i kinematyka	
194	frezowanie	błędy położenia	nierównoległość do podstawy	odkształcenia spowodowane niewyrównoważeniem freza	geometria i kinematyka	
195	frezowanie	błędy położenia	nierównoległość do podstawy	stępienie freza	geometria i kinematyka	
196	frezowanie	błędy położenia	nierównoległość do podstawy (nierównoległość powierzchni obrabianej do powierzchni bazowej)	niewalcowość freza, wynikająca głównie z błędów jego zaostrzenia	geometria i kinematyka	
197	frezowanie	błędy położenia	nierównoległość do podstawy (nierównoległość powierzchni obrabianej do powierzchni bazowej)	nierównoległość osi freza do powierzchni stołu	geometria i kinematyka	Błąd ten wynika z: nierównoległości płaszczyzny stołu do kierunku jego przesuwu oraz nierównoległości prowadnic belki usztywniającej do osi wrzeciona.
198	frezowanie	błędy położenia	nierównoległość do podstawy	odkształcenia cieplne obrabiarki i przedmiotu	oddziaływania cieplne	

199	frezowanie	błędy położenia	nierównoległość do podstawy	odkształcenia cieplne obrabiarki i przedmiotu - zmiana położenia czola freza (wydłużenie wrzeciona) - obróbka wykonywana przed ustaleniem stanu cieplnego frezarki	oddziaływania cieplne	Niezachowanie ustalenia stanu cieplnego frezarki.
200	frezowanie	błędy położenia	nierównoległość do podstawy	wpływ odkształceń cieplnych ostrza narzędzia	oddziaływania cieplne	
201	frezowanie	błędy położenia	nieprostokątność do podstawy	nieprostokątność ruchu narzędzia do podstawy	geometria i kinematyka	
202	frezowanie	błędy położenia	nieprostokątność do podstawy	nieprostokątność osi narzędzia (frezowanie obwodowe) lub jego czola (frezowanie czolowe) do płaszczyzny stołu	geometria i kinematyka	Nieprostokątność ta jest wynikiem nieprostokątności stołu do jego pionowych prowadnic oraz ich nierównoległości do osi wrzeciona.
203	frezowanie	błędy położenia	nieprostokątność do podstawy	nieprostokątność osi wrzeciona do stołu	geometria i kinematyka	
204	frezowanie	błędy położenia	nieprostokątność do podstawy	odkształcenie uchwytu freza od ciężaru własnego i ciężaru freza	geometria i kinematyka	
205	frezowanie	błędy położenia	nieprostokątność do podstawy	niewalcowość freza	geometria i kinematyka	
206	frezowanie	błędy położenia	nieprostokątność do podstawy	odkształcenia przedmiotu i obrabiarki spowodowane siłami skrawania	geometria i kinematyka	
207	frezowanie	błędy położenia	nieprostokątność do podstawy	odkształcenia spowodowane niewyrównoważeniem freza	geometria i kinematyka	
208	frezowanie	błędy położenia	nieprostokątność do podstawy	odkształcenia cieplne obrabiarki i przedmiotu	oddziaływania cieplne	
209	frezowanie	błędy kształtu i błędy powierzchni	niepłaskość, falistość, chropowatość	odkształcenia wywołane niewyrównoważeniem narzędzia, spowodowanym niedokładnym ustawieniem nastawnych ostrzy	geometria i kinematyka	
210	frezowanie	błędy kształtu i błędy powierzchni	niepłaskość, falistość, chropowatość	odkształcenia wywołane niewyrównoważeniem narzędzia, spowodowanym nierówną masą nastawnych ostrzy (np. z powodu wykruszenia odłamka)	geometria i kinematyka	
211	frezowanie	błędy kształtu i błędy powierzchni	niepłaskość, falistość, chropowatość	odkształcenia wywołane niewyrównoważeniem narzędzia, spowodowanym nierównomiernym rozstawieniem nastawnych ostrzy na obwodzie	geometria i kinematyka	
212	frezowanie	błędy kształtu i błędy powierzchni	niepłaskość, falistość, chropowatość	odkształcenia wywołane niewyrównoważeniem narzędzia, spowodowanym niewspółosiowym zamocowaniem freza	geometria i kinematyka	

213	frezowanie - obróbka 2 lub więcej powierzchni przy jednym zamocowaniu przedmiotu i bez przezbrojenia obrabiarki	błędy położenia	nierównoległość powierzchni obrabianych	błędy narzędzia (jak np. niewalcowość freza)	geometria i kinematyka	
214	frezowanie - obróbka 2 lub więcej powierzchni przy jednym zamocowaniu przedmiotu i bez przezbrojenia obrabiarki	błędy położenia	nierównoległość powierzchni obrabianych	zmiana warunków obróbki	warunki procesu	Zmiana warunków obróbki może obejmować: zmianę warunków skrawania; zmianę temperatury otoczenia; zmianę stanu cieplnego obrabiarki itp.
215	frezowanie - obróbka 2 lub więcej powierzchni przy jednym zamocowaniu przedmiotu i bez przezbrojenia obrabiarki	błędy położenia	nierównoległość bocznych płaszczyzn rowka frezowanego za pomocą freza palcowego	niewalcowość freza	geometria i kinematyka	
216	frezowanie - frez o ostrzach prostych	błędy kształtu	niepłaskość	nieprostoliniowość krawędzi narzędzia	geometria i kinematyka	
217	frezowanie - frez walcowy	błędy kształtu	niepłaskość	nieprostoliniowość krawędzi narzędzia	geometria i kinematyka	
218	frezowanie - frez walcowy	błędy kształtu	niepłaskość	wzajemna nierównoległość krawędzi narzędzia	geometria i kinematyka	
219	frezowanie - frez walcowy	błędy kształtu	niepłaskość	krawędzie narzędzia nie są położone na jednej powierzchni walcowej	geometria i kinematyka	
220	frezowanie - frez walcowy	błędy kształtu	niepłaskość - miejscowe wklęsłości powierzchni	zmiennosc promieniowa freza, powodująca zmiany głębokości skrawania	geometria i kinematyka	
221	frezowanie - frez czółowy	błędy kształtu	niepłaskość	nieprostoliniowość krawędzi narzędzia; krawędzie narzędzia nie są położone w jednej płaszczyźnie	geometria i kinematyka	
222	frezowanie - frez czółowy	błędy kształtu	niepłaskość	zmiennosc poosiowa, spowodowana nieprostpadłością powierzchni freza względem osi obrotu	geometria i kinematyka	
223	frezowanie powierzchni czółowej	błędy kształtu	niepłaskość powierzchni czółowej	osiowa podatność wrzeciona	geometria i kinematyka	Siła skrawania przy toczeniu powierzchni czółowej zmienia się z promieniem toczenia.
224	frezowanie - frezowanie frezem czółowym wgłęb	błędy kształtu	nieokrągłość	nieokrągłość otworu w półwyrobie	geometria i kinematyka	
225	struganie	błędy kształtu	niepłaskość	nieprostoliniowość ruchu narzędzia	geometria i kinematyka	
226	struganie	błędy kształtu	niepłaskość	nieprostoliniowość ruchu stołu	geometria i kinematyka	

227	struganie	błędy kształtu	niepłaskość	odkształcenia obrabiarki spowodowane siłą skrawania	geometria i kinematyka	
228	struganie	błędy kształtu	niepłaskość	zmiana podatności obrabiarki w czasie jednego skoku i podczas ruchu posuwowego	geometria i kinematyka	
229	struganie	błędy kształtu	niepłaskość	stępienie noża	geometria i kinematyka	Stępienie noża przy obróbce dużych powierzchni osiągać może dopuszczalne wartości stępienia dla danego rodzaju narzędzi, w czasie skrawania zbliżonym do okresu trwałości ostrza.
230	struganie	błędy kształtu	niepłaskość	odkształcenia noża, których wartość może ulegać zmianie podczas obróbki	geometria i kinematyka	Zmiana siły skrawania może być spowodowana: stępieniem ostrza, nierównomiernym naddatkiem, lub niejednorodnością materiału.
231	struganie	błędy kształtu	niepłaskość	odkształcenia obrabiarki i przedmiotu powodujące zmianę kierunku ruchu noża względem przedmiotu	oddziaływania cieplne	Wartości odkształceń cieplnych mogą być zmienne, z uwagi na długi czas obróbki (na który składają się przejścia robocze i jałowe) spowodowany bardzo dużymi długościami strugania - często do kilkunastu metrów.
232	struganie	błędy kształtu	niepłaskość	odkształcenia cieplne obrabiarki zachodzące podczas obróbki jednej powierzchni	oddziaływania cieplne	Wartości odkształceń cieplnych mogą być zmienne, z uwagi na długi czas obróbki (na który składają się przejścia robocze i jałowe) spowodowany bardzo dużymi długościami strugania - często do kilkunastu metrów.
233	struganie	błędy położenia	-	zmiany głębokości skrawania i posuwu	warunki procesu	
234	struganie	błędy położenia	nierównoległość	nierównoległość powierzchni stołu do jego przesuwu	geometria i kinematyka	
235	struganie	błędy położenia	nierównoległość	nierównoległość powierzchni stołu do przesuwu suwaka	geometria i kinematyka	
236	struganie	błędy położenia	nierównoległość	odkształcenie obrabiarki spowodowane siłą skrawania	geometria i kinematyka	
237	struganie	błędy położenia	nierównoległość	zmiana podatności obrabiarki w czasie jednego skoku i podczas ruchu posuwowego	geometria i kinematyka	
238	struganie	błędy położenia	nierównoległość	stępienie noża	geometria i kinematyka	
239	struganie	błędy położenia	nierównoległość	odkształcenia obrabiarki i przedmiotu powodujące zmianę kierunku ruchu noża względem przedmiotu	oddziaływania cieplne	Wartości odkształceń cieplnych mogą być zmienne z uwagi na długi czas obróbki (na który składają się przejścia robocze i jałowe) spowodowany bardzo dużymi długościami strugania - często do kilkunastu metrów.

240	struganie	błędy położenia	nierównoległość	odkształcenia cieplne obrabiarki zachodzące podczas obróbki jednej powierzchni	oddziaływania cieplne	Wartości odkształceń cieplnych mogą być zmienne z uwagi na długi czas obróbki (na który składają się przejścia robocze i jałowe) spowodowany bardzo dużymi długościami strugania - często do kilkunastu metrów.
241	struganie	błędy położenia	nieprostokątność	nieprostokątność powierzchni bocznej stołu do jego przesuwu	geometria i kinematyka	
242	struganie	błędy położenia	nieprostokątność	nieprostokątność ruchu suportu bocznego do powierzchni stołu	geometria i kinematyka	
243	struganie	błędy położenia	nieprostokątność	odkształcenie obrabiarki spowodowane siłą skrawania	geometria i kinematyka	
244	struganie	błędy położenia	nieprostokątność	zmiana podatności obrabiarki podczas jednego skoku i podczas ruchu posuwowego	geometria i kinematyka	
245	struganie	błędy położenia	nieprostokątność	odkształcenia cieplne powodujące zmianę kierunku ruchu noża względem przedmiotu	oddziaływania cieplne	Wartości odkształceń cieplnych mogą być zmienne z uwagi na długi czas obróbki (na który składają się przejścia robocze i jałowe) spowodowany bardzo dużymi długościami strugania - często do kilkunastu metrów.
246	struganie	błędy położenia	nieprostokątność	odkształcenia cieplne obrabiarki zachodzące podczas obróbki jednej powierzchni	oddziaływania cieplne	Wartości odkształceń cieplnych mogą być zmienne z uwagi na długi czas obróbki (na który składają się przejścia robocze i jałowe) spowodowany bardzo dużymi długościami strugania - często do kilkunastu metrów.
247	wiercenie	błędy wymiarów	-	mimośrodowość krawędzi skrawających w stosunku do uchwytu (bicie ostrzy)	geometria i kinematyka	
248	wiercenie	błędy wymiarów i błędy powierzchni	-	mimośrodowość krawędzi skrawających w stosunku do uchwytu (bicie ostrzy) oraz nierównomierne zużycie ostrzy	geometria i kinematyka	
249	wiercenie	błędy kształtu	nieokrągłość	nieokrągłość ruchu wrzeciona	geometria i kinematyka	Błąd kształtu elementów roboczych łożyska tocznego wrzeciona lub jego niejednakowa podatność mechaniczna w zależności od kierunku działania siły.
250	wiercenie	błędy kształtu	nieokrągłość	zmiennie ugięcie wiertła i wrzeciona	geometria i kinematyka	Niesymetryczne obciążenie, które może być spowodowane: niejednorodnością obrabianego materiału, nierównomiernym w niektórych przypadkach rozłożeniem masy wiertła lub nierównomiernym stępieniem krawędzi skrawających wiertła.

251	wiercenie	błędy kształtu	nieokrągłość	niesymetria zaostrenia wiertła	geometria i kinematyka	Asymetria zaostrenia stożka wiertła jest nieunikniona, lecz nie powinna przekraczać wartości dopuszczalnej.
252	wiercenie	błędy kształtu	nieokrągłość	nierównomierne stępienie ostrzy	geometria i kinematyka	
253	wiercenie	błędy kształtu	nieokrągłość	odkształcenia wrzeciona spowodowane jego niewyrównoważeniem	geometria i kinematyka	
254	wiercenie	błędy kształtu	nieokrągłość	błąd kołowości i walcowości oraz bicie promieniowe i osiowe części obrotowych	geometria i kinematyka	
255	wiercenie	błędy kształtu	nieokrągłość	nieokrągłość otworu w półwyrobie	warunki procesu	
256	wiercenie	błędy kształtu	nieokrągłość	nierównomierna odkształcalność nieregularnie ukształtowanego przedmiotu	warunki procesu	
257	wiercenie	błędy kształtu	nieokrągłość - zwiększenie nieokrągłości obrabianego otworu	zwiększenie sił obciążających układ, spowodowane sumowaniem się wirującej siły skrawania z siłą spowodowaną niewyrównoważeniem układu wirującego	geometria i kinematyka	Niewyrównoważenie układu wirującego jest spowodowane nierównomiernym rozłożeniem mas względem osi obrotu.
258	wiercenie	błędy kształtu	niewalcowość	nieprostoliniowość ruchu wrzeciona	geometria i kinematyka	
259	wiercenie	błędy kształtu	niewalcowość	stożkowość narzędzia	geometria i kinematyka	
260	wiercenie	błędy kształtu	niewalcowość	wygięcie osi narzędzia	geometria i kinematyka	Wygięcie osi narzędzia może być spowodowane pochyleniem osi narzędzia względem osi obrotu wrzeciona.
261	wiercenie	błędy kształtu	niewalcowość	wygięcie osi narzędzia oraz błąd zamocowania narzędzia w uchwycie	geometria i kinematyka	Wygięcie osi narzędzia może być powiększone o błąd zamocowania narzędzia w uchwycie.
262	wiercenie	błędy kształtu	niewalcowość	stępienie narzędzia	geometria i kinematyka	
263	wiercenie	błędy kształtu	niewalcowość	odkształcenia układu spowodowane działaniem sił skrawania - ugięcie wiertła	geometria i kinematyka	
264	wiercenie	błędy kształtu	niewalcowość	odkształcenia spowodowane ciężarem własnym	geometria i kinematyka	
265	wiercenie	błędy kształtu	niewalcowość	zmiana odkształceń od sił niewyrównoważenia w zależności od wysięgu wrzeciona	geometria i kinematyka	
266	wiercenie	błędy kształtu	niewalcowość	odkształcenia osi wrzeciona, powodujące zmiany wartości jego zmienności promieniowej, co m.in. powoduje zmianę wielkości naddatku wzdłuż długości otworu i dalsze ugięcie osi	geometria i kinematyka	
267	wiercenie	błędy kształtu	niewalcowość	błąd kołowości i walcowości oraz bicie promieniowe i osiowe części obrotowych	geometria i kinematyka	
268	wiercenie	błędy kształtu	niewalcowość	odkształcenia spowodowane zmianą temperatur przedmiotu, narzędzia i obrabiarki	oddziaływania cieplne	
269	wiercenie	błędy kształtu	niewalcowość	odchylenie osi wiertła od prostopadłości względem stołu pod wpływem temperatury	oddziaływania cieplne	

270	wiercenie	błędy kształtu	niewalcowość	wygięcie osi otworu spowodowane przemieszczaniem osi wrzeciona, na skutek zmiany stanu cieplnego obrabiarki	oddziaływania cieplne	
271	wiercenie	błędy kształtu	niewalcowość	zmiana naddatku, spowodowana błędami półwyrobu i niejednorodnością materiału	warunki procesu	
272	wiercenie	błędy kształtu	niewalcowość / stożkowość	nieprostokątność ruchu wrzeciona do powierzchni stołu	geometria i kinematyka	Nieprostokątność ruchu tulei wrzeciona do powierzchni stołu powoduje wygięcie osi narzędzia. Nieprostokątność kierunku ruchu wrzeciona do podstawy powoduje powstanie stożkowości otworu.
273	wiercenie	błędy kształtu	niewalcowość / stożkowość	zmiana wartości zmienności promieniowej narzędzia w zależności od wysunięcia wrzeciona	geometria i kinematyka	
274	wiercenie	błędy kształtu	niewalcowość / stożkowość	odkształcenia układu spowodowane działaniem sił skrawania - ugięcie wrzeciona łącznie z kolumną i ramieniem	geometria i kinematyka	
275	wiercenie	błędy położenia	nieprostokątność osi do podstawy	nieprostoliniowość ruchu wrzeciona	geometria i kinematyka	
276	wiercenie	błędy położenia	nieprostokątność osi do podstawy	nieprostokątność ruchu wrzeciona do powierzchni stołu	geometria i kinematyka	
277	wiercenie	błędy położenia	nieprostokątność osi do podstawy	odchylenie osi wiertła od prostokątności względem stołu	geometria i kinematyka	Nieprostokątność osi wiertła do powierzchni stołu jest zależna od: błędów obrabiarki, błędów mocowania narzędzi, błędów ustawienia przedmiotu.
278	wiercenie	błędy położenia	nieprostokątność osi do podstawy	odkształcenia układu spowodowane siłami skrawania	geometria i kinematyka	
279	wiercenie	błędy położenia	nieprostokątność: osi otworu do powierzchni czołowej oraz osi różnych otworów względem siebie	nieprostokątność osi wrzeciona do powierzchni przedmiotu	geometria i kinematyka	
280	wiercenie	błędy położenia	nieprostokątność: osi otworu do powierzchni czołowej oraz osi różnych otworów względem siebie	niedokładność ustalenia położenia stołu przy obrocie	geometria i kinematyka	
281	wiercenie	błędy położenia	nierównoległość: osi otworu do powierzchni podstawy lub nierównoległość osi różnych otworów	nierównoległość osi wrzeciona do powierzchni stołu	geometria i kinematyka	

282	wiercenie	błędy położenia	nierównoległość: osi otworu do powierzchni podstawy lub nierównoległość osi różnych otworów	nieprostoliniowość pionowych prowadnic wrzeciennika (przy otworach wykonywanych na różnej wysokości)	geometria i kinematyka	
283	wiercenie	błędy położenia	nierównoległość: osi otworu do powierzchni podstawy lub nierównoległość osi różnych otworów	nieprostoliniowość i nieprostopadłość prowadnic stołu do osi wrzeciona (przy obróbce otworu w jednym poziomie)	geometria i kinematyka	
284	wiercenie	błędy położenia	niewłaściwe położenie osi	nieprostopadłość wrzeciona do powierzchni stołu	geometria i kinematyka	
285	wiercenie	błędy położenia	niewłaściwe położenie osi	niedokładność wymiarowa wiertła	geometria i kinematyka	
286	wiercenie	błędy położenia	niewłaściwe położenie osi	zużycie wiertła na powierzchniach prowadzących	geometria i kinematyka	
287	wiercenie	błędy położenia	niewłaściwe położenie osi	odchylenie osi wiertła od prostopadłości względem stołu	geometria i kinematyka	
288	wiercenie	błędy położenia	niewspółosiowość	nierównoległość osi obrotu narzędzia do kierunku posuwu	geometria i kinematyka	
289	wiercenie	błędy położenia	niewspółosiowość	nieprostoliniowość ruchu narzędzia	geometria i kinematyka	
290	wiercenie	błędy położenia	niewspółosiowość	nierównoległość osi wrzeciona do powierzchni stołu	geometria i kinematyka	
291	wiercenie	błędy położenia	niewspółosiowość	zmiennosc poosiowa powierzchni stołu	geometria i kinematyka	
292	wiercenie	błędy położenia	niewspółosiowość	odkształcenia spowodowane ciężarem własnym	geometria i kinematyka	
293	wiercenie	błędy położenia	niewspółosiowość	odkształcenia obrabiarki spowodowane siłą skrawania	geometria i kinematyka	
294	wiercenie	błędy położenia	niewspółosiowość	zmiana odkształceń od sił niewyrównoważenia w zależności od wysięgu wrzeciona	geometria i kinematyka	
295	wiercenie - obróbka na obrabiarkach współrzędnościowych	błędy położenia	niewłaściwe położenie osi	odkształcenia obrabiarki podczas obróbki, głównie cieplne	oddziaływania cieplne	
296	wiercenie - obróbka na obrabiarkach współrzędnościowych	błędy położenia	niewłaściwe położenie osi	niedokładność nastawienia obrabiarki na wymiar	warunki procesu	

297	wiercenie - w przyrządzie przez tuleje wiertarskie	błędy kształtu	niewalцовość / stożkowość	pochylenie narzędzia	geometria i kinematyka	W przypadku obróbki otworu z wykorzystaniem tulei wiertarskiej, narzędzie zyskuje dodatkowe prowadzenie, zmniejszające wpływ błędów i odkształceń obrabiarki. Pochylenie narzędzia zależy wówczas od luzu między jego powierzchniami prowadzącymi a powierzchnią tulei wiertarskiej (luz między tuleją i wiertłem rośnie wraz z zużyciem narzędzia i tulei).
298	wiercenie - w przyrządzie przez tuleje wiertarskie	błędy położenia	niewłaściwe położenie osi	niedokładność położenia osi otworów w tulejach przyrządu	geometria i kinematyka	
299	wiercenie - w przyrządzie przez tuleje wiertarskie	błędy położenia	niewłaściwe położenie osi	błąd położenia tulei	geometria i kinematyka	
300	wiercenie - w przyrządzie przez tuleje wiertarskie	błędy położenia	niewłaściwe położenie osi	wielkość luzu między tuleją a narzędziem	geometria i kinematyka	
301	wiercenie - w przyrządzie przez tuleje wiertarskie	błędy położenia	niewłaściwe położenie osi	pochylenie wiertła w tulei	geometria i kinematyka	
302	wiercenie (z zastosowaniem stołu obrotowego)	błędy położenia	niewspółosiowość otworów - pochylenie	nierównoległość osi obrotu wrzeciona do powierzchni stołu	geometria i kinematyka	
303	wiercenie (z zastosowaniem stołu obrotowego)	błędy położenia	niewspółosiowość otworów - pochylenie	zmiennosc poosiowa powierzchni stołu	geometria i kinematyka	
304	wiercenie (z zastosowaniem stołu obrotowego)	błędy położenia	niewspółosiowość otworów - mimośrodowość	mimośrodowość powierzchni obrobionych w dwu pozycjach stołu zależy od tego, czy oś obrotu stołu przecina się z osią wrzeciona	geometria i kinematyka	
305	wiercenie - rozwiercanie	błędy kształtu	niewalцовość / stożkowość	nieodpowiednia geometria ostrza narzędzia	geometria i kinematyka	Nieodpowiedni kąt pochylenia głównej krawędzi skrawającej i długość części kalibrującej.
306	wiercenie - rozwiercanie	błędy kształtu	niewalцовość / stożkowość	zmiana prędkości skrawania	warunki procesu	

307	przeciąganie	błędy kształtu	-	nierównomierne odkształcenia sprężyste podczas obróbki, spowodowane nierównomierną grubością ścianek przedmiotu	warunki procesu	
308	przeciąganie	błędy kształtu	błędy kształtu powierzchni obrabianej w przekroju poprzecznym	niedokładność kształtu narzędzia	geometria i kinematyka	
309	przeciąganie	błędy kształtu	błędy w przekroju wzdłużnym	nieprostoliniowość ruchu narzędzia względem przedmiotu	geometria i kinematyka	
310	przeciąganie	błędy kształtu	błędy w przekroju wzdłużnym	nierównomierna grubość ścianek przedmiotu	warunki procesu	

311	przeciąganie	błędy położenia	błędy położenia otworów przeciąganych	błędy wstępnie wykonanego otworu do prowadzenia przeciągacza	warunki procesu	
312	szlifowanie	błędy kształtu	nieokrągłość	nieokrągłość trajektorii osi wrzeciona przedmiotowego	geometria i kinematyka	
313	szlifowanie	błędy kształtu	nieokrągłość	niedokładność skojarzenia kiel-nakiełek	geometria i kinematyka	
314	szlifowanie	błędy kształtu	nieokrągłość	niejednakowa zmienność promieniowa wrzeciona spowodowana siłami niewyrównoważenia	geometria i kinematyka	
315	szlifowanie	błędy kształtu	nieokrągłość	niejednakowa zmienność promieniowa wrzeciona spowodowana nagraniem	oddziaływania cieplne	
316	szlifowanie	błędy kształtu	nieokrągłość	nieokrągłość półwyrobu	warunki procesu	
317	szlifowanie	błędy kształtu	niewalcowość	nierównoległość ruchu ściernicy do osi kłów	geometria i kinematyka	
318	szlifowanie	błędy kształtu	niewalcowość	odkształcenia spowodowane ciężarem własnym przedmiotu	geometria i kinematyka	
319	szlifowanie	błędy kształtu	niewalcowość	odkształcenie obrabiarki od sił skrawania	geometria i kinematyka	
320	szlifowanie	błędy kształtu	niewalcowość	odkształcenia cieplne przedmiotu	oddziaływania cieplne	
321	szlifowanie	błędy kształtu	niewalcowość	zmiana położenia osi kłów w wyniku odkształceń cieplnych	oddziaływania cieplne	
322	szlifowanie	błędy kształtu	niewalcowość	odkształcenie cieplne prowadnic	oddziaływania cieplne	
323	szlifowanie	błędy kształtu	niewalcowość	odkształcenia cieplne przedmiotu i obrabiarki	oddziaływania cieplne	
324	szlifowanie (obróbka przedmiotów obrotowych)	błędy kształtu	niewalcowość - stożkowatość	niewspółosiowość osi stereometrycznych i osi obrotu	geometria i kinematyka	
325	szlifowanie	błędy kształtu	niepłaskość powierzchni	nieprostoliniowość ruchu przedmiotu względem narzędzia	geometria i kinematyka	
326	szlifowanie	błędy kształtu	niepłaskość powierzchni	odkształcenia wrzeciona spowodowane siłami niewyrównoważenia	geometria i kinematyka	
327	szlifowanie	błędy kształtu	niepłaskość powierzchni	niepłaskość półwyrobu	warunki procesu	
328	szlifowanie	błędy położenia	niepłaskość powierzchni	niepłaskość przesuwu przedmiotu względem ściernicy	geometria i kinematyka	
329	szlifowanie	błędy położenia	niepłaskość powierzchni	odkształcenie obrabiarki spowodowane siłami skrawania	geometria i kinematyka	
330	szlifowanie	błędy położenia	niepłaskość powierzchni	odkształcenie cieplne obrabiarki	oddziaływania cieplne	
331	szlifowanie - w uchwycie	błędy kształtu	nieokrągłość	niedokładność skojarzenia kiel-nakiełek	geometria i kinematyka	

332	szlifowanie - w kłach lub w uchwycie	błędy kształtu	nieokrągłość	odkształcenia trajektorii osi wrzeciona przedmiotowego	geometria i kinematyka	Odształcenia te mogą być spowodowane: niedokładnością elementów łożysk lub zmianą podatności wrzeciona w zależności od kąta obrotu (zarówno przy stałym jak i zmiennym kierunku działania siły).
333	szlifowanie - w kłach lub w uchwycie	błędy kształtu	nieokrągłość	niedokładność i podatność przy mocowaniu przedmiotu.	geometria i kinematyka	
334	szlifowanie - w kłach lub w uchwycie	błędy kształtu	niewalcowość	nierównoległość ruchu suportu do osi wrzeciona	geometria i kinematyka	
335	szlifowanie - w kłach lub w uchwycie	błędy kształtu	niewalcowość	odkształcenia od sił mocowania	geometria i kinematyka	
336	szlifowanie - w kłach lub w uchwycie	błędy kształtu	niewalcowość	odkształcenia spowodowane ciężarem własnym	geometria i kinematyka	
337	szlifowanie - w kłach lub w uchwycie	błędy kształtu	niewalcowość	odkształcenia przedmiotu i obrabiarki od sił skrawania	geometria i kinematyka	
338	szlifowanie - w kłach lub w uchwycie	błędy kształtu	niewalcowość	stępienie narzędzia	geometria i kinematyka	
339	szlifowanie - w kłach lub w uchwycie	błędy kształtu	niewalcowość	odkształcenia cieplne prowadnic	oddziaływania cieplne	
340	szlifowanie - w kłach lub w uchwycie	błędy kształtu	niewalcowość	odkształcenia cieplne przedmiotu i narzędzia	oddziaływania cieplne	
341	szlifowanie - w kłach lub w uchwycie	błędy kształtu	niewalcowość - stożkowość	zużycie narzędzia	geometria i kinematyka	
342	szlifowanie - w kłach lub w uchwycie	błędy kształtu	niewalcowość - beczkowatość	podatność przedmiotu jest większa od podatności wrzeciona i konika	geometria i kinematyka	
343	szlifowanie - w kłach lub w uchwycie	błędy kształtu	niewalcowość - wklęsłość-zwężkowość	podatność przedmiotu jest mniejsza od podatności wrzeciona i konika	geometria i kinematyka	
344	szlifowanie - w kłach lub w uchwycie	błędy kształtu	niewalcowość	przemieszczanie i odkształcanie elementów obrabiarki spowodowane różnicami temperatur	oddziaływania cieplne	Spowodowane znacznymi (nawet do 30 stopni C) różnicami temperatury poszczególnych elementów obrabiarki.
345	szlifowanie - w kłach lub w uchwycie	błędy kształtu	niewalcowość	drżania układu OUPN	drżania	Wystąpienie drgań w procesie szlifowania może spowodować nawet trzykrotne zwiększenie podatności.
346	szlifowanie - w kłach lub w uchwycie	błędy położenia	niewspółosiowość	zmiennosc promieniowa kłków	geometria i kinematyka	
347	szlifowanie - w kłach lub w uchwycie	błędy powierzchni	chropowatość i falistość	drżania dużej częstotliwości	drżania	Drżania dużej częstotliwości (z uwagi na dużą prędkość obrotową elementów wirujących), spowodowane są siłami niewyrównoważenia.

348	szlifowanie - szlifowanie bezkłowe	błędy wymiaru	równomierny na całej długości przyrost średnicy przedmiotu	oddalenie się osi tarcz od siebie pod wpływem sił skrawania	geometria i kinematyka	
349	szlifowanie - szlifowanie bezkłowe	błędy kształtu	nieokrągłość - zarys wielokątowy przedmiotu szlifowanego	przesuw przedmiotu w kierunku pionowym (możliwy ponieważ przedmiot nie jest zamocowany)	geometria i kinematyka	
350	szlifowanie - szlifowanie bezkłowe	błędy kształtu	niewalcowość	odchylenie podtrzymki od prostoliniowości	geometria i kinematyka	
351	szlifowanie - szlifowanie bezkłowe	błędy kształtu	niewalcowość	nierównoległość podtrzymki do linii styku przedmiotu ze ściernicą	geometria i kinematyka	
352	szlifowanie - szlifowanie bezkłowe	błędy kształtu	niewalcowość	odkształcenia cieplne wpływające na zmianę ustawienia podtrzymki	oddziaływania cieplne	
353	szlifowanie - szlifowanie płaszczyzn	błędy wymiaru	-	niedokładność nastawienia obrabiarki na wymiar	warunki procesu	
354	szlifowanie - szlifowanie płaszczyzn	błędy kształtu	niepłaskość powierzchni obrabianej	nieprostoliniowość ruchu stołu	geometria i kinematyka	
355	szlifowanie - szlifowanie płaszczyzn	błędy kształtu	niepłaskość powierzchni obrabianej	odkształcenia wrzeciona obrabiarki, jakie mogą zachodzić w trakcie obróbki danej powierzchni	geometria i kinematyka	
356	szlifowanie - szlifowanie płaszczyzn	błędy położenia	nierównoległość powierzchni do bazy	nierównoległość płaszczyzny stołu do jego przesuwu	geometria i kinematyka	
357	szlifowanie - szlifowanie płaszczyzn	błędy położenia	nierównoległość powierzchni do bazy	nieprostokątowość osi wrzeciona do powierzchni stołu	geometria i kinematyka	Wartość tego błędu może ulec zmianie pod wpływem odkształceń cieplnych.
358	szlifowanie: obróbka płaszczyzn i zewnętrznych powierzchni obrotowych	błędy powierzchni	falistość	błąd kołowości i walcowości oraz bicie promieniowe i osiowe części obrotowych	geometria i kinematyka	
359	gładzenie (honowanie)	błędy kształtu	-	wejściowa niedokładność kształtu półwyrobu	warunki procesu	
360	gładzenie (honowanie) tulei	błędy kształtu	-	grubość (nierównomierność grubości) ścianek otworu, wpływająca na wartość odkształceń sprężystych	warunki procesu	
361	gładzenie (honowanie)	błędy kształtu	-	niejednorodność materiału	warunki procesu	
362	gładzenie (honowanie)	błędy kształtu	-	twardość narzędzia	warunki procesu	

363	obróbka powierzchni tworzonych kinematycznie (nacinanie gwintu lub obróbka obwiedniowa, np. kół zębatych)	błędy wymiarów	-	niezachowanie określonego stosunku prędkości ruchu narzędzia do prędkości ruchu przedmiotu	geometria i kinematyka	
364	obróbka powierzchni tworzonych kinematycznie (nacinanie gwintu lub obróbka obwiedniowa, np. kół zębatych)	błędy wymiarów	-	niejednostajność przełożenia między liczbą obrotów narzędzia i przedmiotu	geometria i kinematyka	Niejednostajność ta może wynikać z mimośrodowości średnic podziałowych uzębień i odchyłek w kołach zębatych biorących udział w przełożeniu ruchu.
365	obróbka powierzchni tworzonych kinematycznie (np. toczenie stożka metodą dwu posuwów, toczenie gwintów, nacinanie kół zębatych)	błędy kształtu	-	odchyłki od założonych wzajemnych prędkości ruchów - brak ścisłej zależności	geometria i kinematyka	
366	obróbka powierzchni tworzonych kinematycznie (np. toczenie stożka metodą dwu posuwów, toczenie gwintów, nacinanie kół zębatych)	błędy położenia	-	odchyłki od założonych wzajemnych prędkości ruchów - brak ścisłej zależności	geometria i kinematyka	

ZAŁĄCZNIK B

system ekspertowy
Identyfikacja potencjalnych przyczyn błędów obróbki skrawaniem
(PC-Shell 4.0)

Nośnik – płyta CD