

# Zarządzanie jakością

## Six Sigma, ppm, Cpk

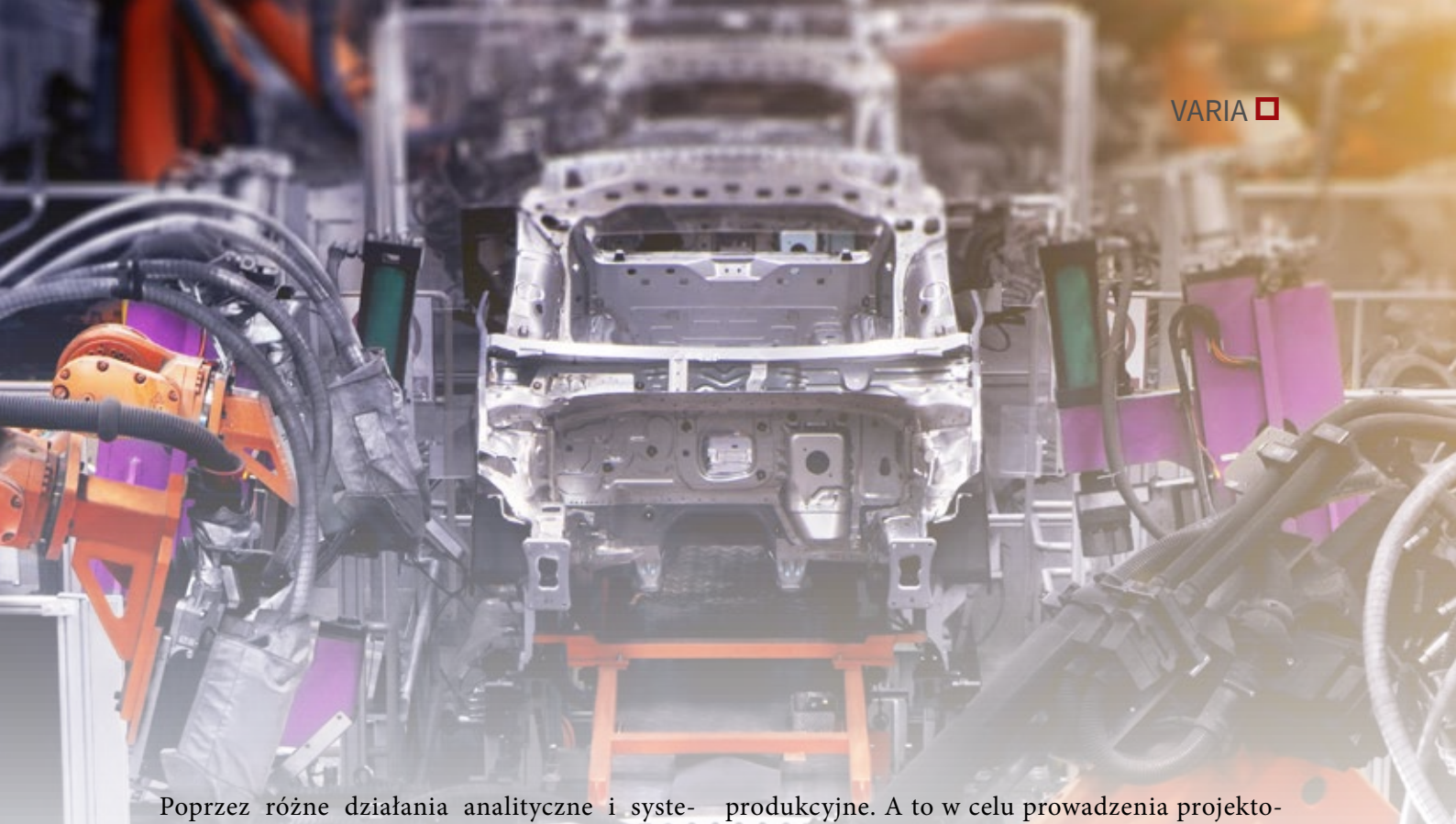
Nowoczesne systemy zarządzania jakością w przedsiębiorstwie opierają się w zasadzie na dwóch głównych rodzajach. Total Quality Management (TQM) to stopniowe poprawianie i ulepszanie procesów. W skład systemu wchodzi takie metody jak Six Sigma czy Failure Mode & Effects Analysis. Efekty tego systemu zarządzania jednak nie zawsze przynoszą pożądane rezultaty, dlatego stosuje się też przeciwstawną koncepcję radykalnych zmian w całej firmie tzw. reengineering. Business Proces Reengineering (BPR) to przebudowa, reorganizacja procesów w przedsiębiorstwie. Kluczową rolę odgrywa tu technologia informatyczna, która umożliwia dokonanie zmian. Założeniem BPR jest porzucenie starych zasad oraz fundamentalnych założeń, które stanowiły podstawę działania organizacji. Spośród wielu przetestowanych metod w ramach tych głównych sposobów zarządzania jakością, chciałbym zwrócić uwagę na metodę Six Sigma oraz wyznaczenie wskaźników ppm i Cpk.

### Aleksander Łukomski

**W** pewnej fabryce samochodów produkującej 750 pojazdów w ciągu doby (a więc około 150 tys. samochodów na rok), kierownictwo fabryki dopuszcza do złomowania w wydziale spawalni w ciągu roku 80 nadwozi z powodu ich złej jakości. Za każde złomowane nadwozie powyżej tej liczby wydział musi zapłacić fabryce określoną kwotę zgodną z wartością kosztową tego nadwozia. To w zasadzie przekłada się na mniejsze premie dla załogi wydziału spawalni. Okazuje się, że mimo wysokiego stopnia mechanizacji i automatyzacji w produkcji tego samochodu, mimo zastosowania mnóstwa robotów, stosowania najnowszych rozwiązań zapewniających maksymalną jakość przy obecnym stanie wiedzy na ten temat, braków nie da się uniknąć. Bywa, że powstają one z powodów złej dyspozycji pracowników (niekiedy żartobliwie mówi się, że nie powinno

się kupować samochodów wyprodukowanych w piątek po południu i poniedziałek rano). Może to być też spowodowane przez zastępstwo dotychczasowego operatora przez operatora, który dopiero nabiera doświadczenia. Oczywiście są też inne przyczyny, np. jakość materiału, awaria urządzeń czy zużycie narzędzi.

Jeżeli odniesiemy liczbę 80 szt. złomowanych kadłubów nadwozi do ilości wyprodukowanych w ciągu roku samochodów w tej fabryce, to okaże się, że stanowi ona ok. 0,05% wyprodukowanych kadłubów nadwozi. Wydaje się to mało. Jednak 80 szt. pomnożone przez np. 6000 zł za kadłub to daje już 480000 zł straty. W czasie ostrej walki z kosztami jest to już pokaźna kwota. Należy przyjąć, że na innych wydziałach ustanawia się podobne limity, a więc suma tych braków może stanowić znaczącą pozycję w kosztach produkcji.

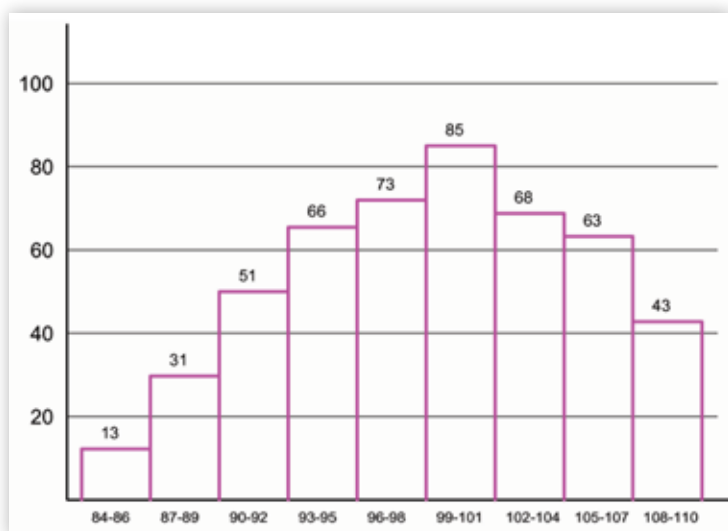


Poprzez różne działania analityczne i systemowe można starać się zmniejszyć tę stratę. Określone przez kierownictwo limity powstają bowiem na podstawie drobiazgowych analiz i obliczeń związanych ze wskaźnikiem ppm.

Wskaźnik ppm (*percent per million*) powiązany jest z metodą Six Sigma. Określa się go w odniesieniu procentowym zgłoszonych przez klientów braków wyrobu w stosunku do 1 miliona tych wyprodukowanych i sprzedanych wyrobów. W ogólnej produkcji przemysłowej standardem jest wartość 1,33 ppm, przy której wadliwość wynosi 0,0063%.

Kierownictwo koncernu (czy też fabryki w ramach koncernu) ustanawia pewne cele określając prognozowane wielkości wskaźnika ppm. Z doświadczenia wiadomo, że zwykle cel jest mniej więcej osiągany, jednak konieczne jest stałe jego kontrolowanie i nadzór. Przykład ze złomowanymi nadwoziami nie jest może najlepszy, bo pomaga do rozliczeń pomiędzy wydziałami fabryki, albo pomiędzy fabrykami koncernu. Wydziały i fabryki mają dużą suwerenność finansową i bardzo ściśle pilnują kosztów. Nawiasem mówiąc, niekiedy te złomowane kadłuby samochodów (a także inne zespoły) odkupują od wydziałów współpracujące z fabryką firmy inżynierskie, wykonujące różne stanowiska i linie

produkcyjne. A to w celu prowadzenia projektowania i do przeprowadzania prób działania budowanych dla fabryki urządzeń technologicznych lub też do wykorzystania w próbach niszczących, np. przy badaniu wytrzymałości zgrzein. W takiej sytuacji ten wskaźnik jest więc trochę zafałszowany. Często wskaźnik ppm jest używany do prowadzenia analiz w sytuacji np. potrzeby zwiększenia programu produkcji. Przykładowo, przy produkcji 700 samochodów na dobę jest konieczność zwiększenia programu produkcji o 50 samochodów na dobę do 750, przy jak najmniejszym nakładzie inwestycyjnym, ale przy zachowaniu jak najlepszej jakości – co najmniej na poziomie, jaki osiągnięto przy dotychczasowej produkcji. W zasadzie nie ma możliwości zwielokrotnienia stanowisk produkcyjnych, ze względu na brak powierzchni produkcyjnej, już maksymalnie wykorzystanej. Można co najwyżej dołożyć minimalną liczbę urządzeń technologicznych, zamienić niektóre stanowiska na bardziej zautomatyzowane lub poprawić wydajność innych stanowisk w inny sposób, dodając jakieś urządzenie lub zwiększając liczbę operatorów (np. zgrzewaczy), albo też przerzucając część zabiegów na inne stanowiska. Określa się też i wylicza prawdopodobieństwo osiągnięcia tego założonego celu.



Rys. 1 Przykładowy histogram

Analizy prawdopodobieństwa uzyskania tej jakości wykonywane są z wykorzystaniem rozkładu dwumianowego. W efekcie obliczeń otrzymuje się prawdopodobieństwo uzyskania 750 szt. samochodów na dobę w wymaganej jakości przy wykonaniu w przeliczeniu na dobę np. 750,4 samochodów. W zasadzie robi się te analizy dla każdego wydziału fabryki, a nawet dla każdego stanowiska produkcyjnego, gdy oblicza się to prawdopodobieństwo dla każdego z nich. Przy prawdopodobieństwie 70-80% prowadzi się dalsze analizy oraz podejmuje próby poprawy jakości na tych stanowiskach przy wykorzystaniu środków technicznych – dalszej automatyzacji i robotyzacji, oraz niekiedy stosując dodatkowo analizy i wylczenia przy zastosowaniu statystycznej kontroli procesu.

Metoda Six Sigma, powiązana ze wskaźnikiem ppm, jest sposobem oceny sytuacji, zjawiska którym się zajmujemy lub tego, co jest nadzorowane. Wykorzystuje dane z analizy statystycznej zjawiska. Jednym z narzędzi Six Sigma jest histogram, pokazujący liczebność występowania pewnej zmiennej w danym okresie. Metoda pozwala analizować historię na bazie dostępnych danych historycznych, pomiarów, wartości minimalnych oraz maksymalnych, co umożliwia wnioskować o wydarzeniach w przyszłości, a więc w stosunku do założeń projektowych lub oczekiwań klienta. Najczęściej stosuje się kilka

histogramów, które pokazują różnicę między możliwościami a oczekiwaniami. Stosuje się różne pomiary, które pokazują prawdopodobieństwo wystąpienia wady oraz możliwy zakres jej występowania. Standardowe odchylenia podzielone przez szerokość tolerancji nazywa się poziomem Sigmy. Działania te wykonywane są wtedy, kiedy proces wykracza poza oczekiwaną przez klienta tolerancję. Tutaj miernikiem procesu jest wskaźnik CTQ (*Critical To Quality*), który uwzględnia wyniki pomiaru w stosunku do zakładanej tolerancji. Możemy dzięki niemu określić wskaźniki krytyczne dla jakości i określić potencjalne problemy.

**Zagadnienia zarządzania jakością są względnie dobrze opisane w literaturze technicznej, zwłaszcza teoretycznie. Brakuje jednak wzorców praktycznych, zwłaszcza dla mniejszych firm i dla systemów bardziej skomplikowanych niż popularne zarządzanie jakością wg ISO 9000.**

Często stosuje się równolegle ze wskaźnikiem ppm wskaźnik Cpk (*Process Capability Index*), który jest też tak jak ppm miarą wad, tylko inaczej liczoną. Cpk to inaczej: wskaźnik zdolności procesu. Zdolność procesu to z kolei spełnienie przez proces wymogów jakościowych. Uwzględniając tolerancję badanej właściwości, można określić potencjalne i rzeczywiste zdolności procesu do spełnienia tych wymagań. Poprzez to można stwierdzić ile wyrobów mieści się w założonych granicach specyfikacji. Zdolność procesu związana jest z realizacją procesu produkcyjnego, a w szczególności produkcji wielkoseryjnej i masowej, której dobrym przykładem jest przemysł motoryzacyjny. Aby ocenić zdolność procesu należy odnieść bezpośrednio jego rozrzut, szacowany zazwyczaj w oparciu o rozstęp lub odchylenie standardowe, do szerokości założonego pola tolerancji. Dla zbadania zdolności procesu należy zebrać odpowiednią

liczbę pomiarów danej cechy jakościowej. Wyznaczenie cechy, ustalenie jej sposobu pomiaru i tolerancji jest niekiedy kłopotliwe, jeżeli w zespole produkcyjnym są też stanowiska z trudnymi do ustalenia wielkościami pomiarowymi, np. mycia samochodu po próbach drogowych, czy woskowania nadwozia lub podobne. W tych nietypowych przypadkach mierzy się np. ilość litrów wody do umycia nadwozia lub masę wosku używanego do woskowania samochodu przed wystaniem go na postój na placu.

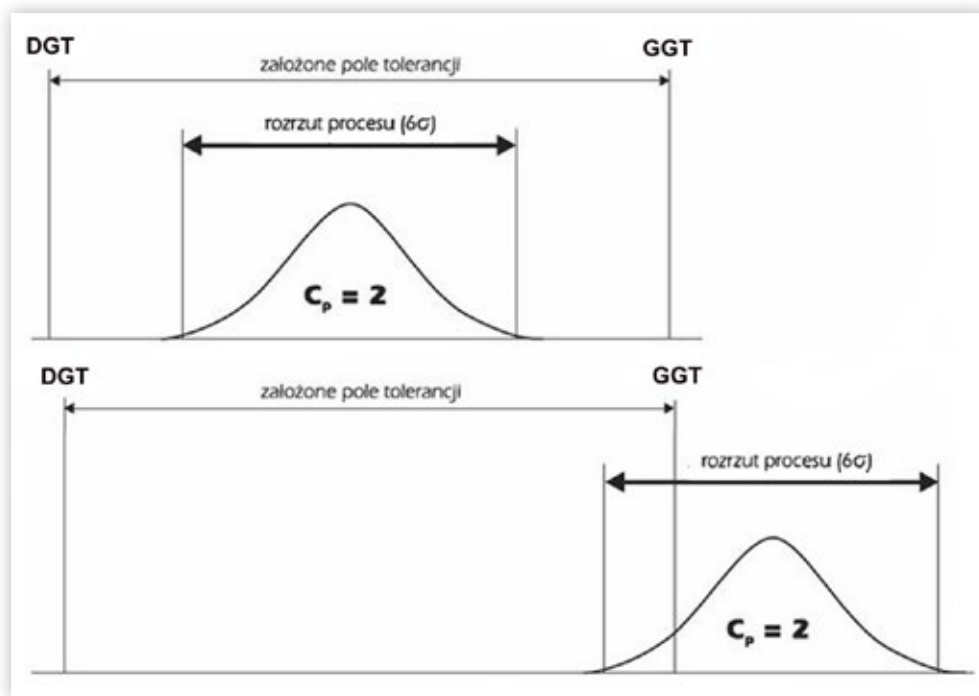
W normalnych stanowiskach produkcyjnych są jakieś spoiny, zgrzeiny, jakość powłoki malarskiej, odchylenia od założonego kształtu wytłoczek itp., które stosunkowo łatwo jest kontrolować i kontrola tych parametrów jest znana.

W niektórych liniach produkcyjnych stosuje się też bardziej wyrafinowane systemy kontroli, takie jak Poka Yoke (zapobieganie błędowi wynikającemu z chwilowego rozkojarzenia pracownika, chwilowej utraty koncentracji podczas wykonywania czynności), czy perceptron, który jest jednym z układów sztucznej sieci neuronowej, stosowanej praktycznie do kontroli przebiegu produkcji. Nazwa perceptron tu używana do określenia przyrządu pomiarowo-kontrolnego wraz z odpowiednim sterowaniem elektronicznym i odpowiednim oprogramowaniem.

Następnie oblicza się parametry:

- średnią arytmetyczną,
- rozstęp,
- odchylenie standardowe.

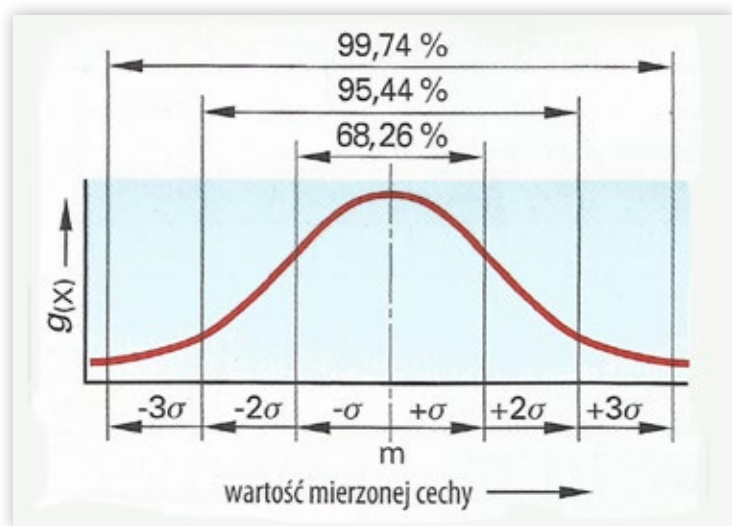
Wartość średnia powinna pokrywać się ze środkiem pola tolerancji, a odchylenie standardowe stanowić maksymalnie 1/6 tego pola. Jeżeli



Rys. 2 Wyznaczania przebiegu procesu. Wartość wskaźnika  $C_p$  przy różnym położeniu procesu. Na wykresie górnym proces mieści się idealnie w polu tolerancji. Na dolnym widać, że proces może mieć szerokość mniejszą niż pole tolerancji, np.  $C_p = 2$  i jednocześnie np. 90% wyrobów niezgodnych, gdy jest przesunięty poza pole tolerancji.

założymy, że badana próba ma rozkład normalny, to w polu tolerancji musi się mieścić co najmniej  $6\sigma$  – sześć sigm, czyli 99,74% wszystkich wyrobów. Należy dążyć do sytuacji, gdy w tolerancji mieści się 8, 10 lub nawet 12 wartości sigma. Im szerokość procesu jest mniejsza w odniesieniu do szerokości pola tolerancji, tym proces ma większą zdolność.

Z podstaw statystyki wiadomo, że w sześciu odchyleniach standardowych, w rozkładzie normalnym lub zbliżonym do normalnego, znajduje się 99,74 % wyników. W związku z tym, różnica górnej granicy tolerancji (GGT, inaczej USL – *Upper Specification Limit*) i dolnej granicy tolerancji (DGT, inaczej LSL – *Lower Specification Limit*), podzielona przez  $6\sigma$  daje wskaźnik  $C_p$  (*Process Capability*) – prognozowany. Wskaźniki  $C_p$  i  $C_{pk}$  liczy się wg trochę innych wzorów. Wskaźnik  $C_{pk}$  wskazuje, w którym kierunku przemieszczają się wyniki, w lewo czy w prawo. W idealnym przypadku, gdy  $C_p = C_{pk}$  lub ich wartości są bardzo zbliżone, mamy pewność, że proces jest stabilny. Idealnie byłoby, gdyby wartość  $C_p$  wynosiła 2 lub więcej. Wtedy wyniki znajdują się dwa razy dalej



Rys. 3 Prawdopodobieństwo rozkładu normalnego wg krzywej Gausa. Odchylenie standardowe  $\sigma$  pokazuje rozrzut – odchylenie od wartości średniej. Dla  $6\sigma$  w tolerancji powinno mieścić się 99,74% wyrobów.  $g$  – gęstość pomiarów

od granic tolerancji, a proces jest bardzo stabilny. W przypadku, gdy wartość ta wynosi 1, oznacza to, że szerokość procesu jest równa zakresowi tolerancji. Zgodnie z własnościami rozkładu normalnego, wadliwość wynosi wtedy 0,27%.

Wskaźnik  $C_p$  – to zdolność potencjalna, wskazuje precyzję procesu. Jest miarą szerokości rzeczywistego rozrzutu względem szerokości pola tolerancji. Wskaźnik  $C_{pk}$  – to zdolność rzeczywista, wskazuje dokładność procesu. Uwzględnia wzajemne przesunięcie pola rozrzutu względem pola tolerancji, jednostronnie – prawostronnie lub lewostronnie. Im wyższy wskaźnik  $C_{pk}$ , tym dokładniej proces przebiega zgodnie ze specyfikacjami i tym więcej jest dobrych części na milion.

Wskaźnik ppm (ilość wadliwych części na milion) często przelicza się, np. 0,002 ppm oznacza, że na każdy milion wyprodukowanych części jest 0,002 części wadliwych.  $1000000 - 0,002 = 999999,998$ . Wobec czego  $999999,998/1000000 \times 100 = 99,99998\%$  części dobrych (niewadliwych). Mieści się to w wartości sześciu sigma. Wtedy  $C_{pk}$  wynosi 2. Im więcej miejsc dziesiętnych, tym dokładniejsze obliczenia i lepszy wskaźnik  $C_{pk}$ . Firmy stosujące metodologię Six Sigma pracują nad zmniejszeniem braków do niskiego poziomu – sześciu sigma / standardowych odchylen od średniej lub 99,99% bez defektów.

W metodzie Six Sigma wykorzystywana jest też statystyczna kontrola procesu. Jest to bardziej praktyczna metoda kontroli związana z systemem zarządzania jakością Six Sigma. Pomaga połączyć w sensie statystycznym parametry mierzalne z polem tolerancji. Im wyższa zdolność tym mniejsze prawdopodobieństwo uzyskania mierzonej wartości w granicach tolerancji. A to zmniejsza prawdopodobieństwo otrzymania wartości mierzonej w pobliżu tolerancji i zmniejsza się prawdopodobieństwo przekroczenia granicy tolerancji. Dalekie usytuowanie od granicy tolerancji to większa zdolność procesu, zmniejsza się ryzyko uzyskania wadliwego wyrobu.

W procesie wykorzystywane są tzw. karty kontrolne Shewharta, amerykańskiego naukowca, który opisał i usystematyzował metodę statystycznej kontroli procesem. Są to:


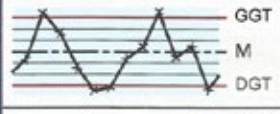
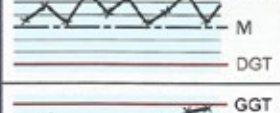

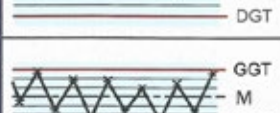

- karta sterowania procesem,
- karta jakościowego odbioru,
- karta danych pierwotnych,
- karta mediany i rozstępu,
- karta wartości średnich i odchylenia standardowego.

Wykonuje się szereg różnych obliczeń i wykresów dla sterowania w próbach (pomiarach) ciągłych lub próbach wrywkowych. Dla prób wrywkowych nieco inaczej wygląda rozkład Gausa. Na rysunku 3 pokazano rozkład dla prób ciągłych. Dla prób wrywkowych krzywa ma przebieg bardziej stromy.

Należy zakładać, że w produkcji seryjnej czas produkcji w fazie dochodzenia do zdolności technologicznej czy produkcyjnej wiąże się z pewnymi przekroczeniami tolerancji i to zarówno w jedną, jak i w drugą stronę. Związane jest to ze stopniowym opanowywaniem produkcji przez operatorów i kierownictwo produkcji. Może to występować nie tylko w fazie uruchamiania nowej produkcji, ale też po modyfikacji linii produkcyjnej, a nawet po dłuższej przerwie w produkcji, np. po przerwie urlopowej. W produkcji motoryzacyjnej może to obejmować np. 50 samochodów

lub nawet więcej. Przy rozruchu nowej produkcji okres dochodzenia do zdolności technologicznej i jakościowej często wynosi około sześciu miesięcy. Później następuje pewna stabilizacja (w tabeli 1, w rubryce seria lub tercja środkowa), co jest pożądane. Następnie kontroluje się trend, co pozwala w porę dokonać odpowiednich analiz dla wychwycenia źródła pojawiających się anomalii lub błędów. Koncerny motoryzacyjne mają doświadczenie w dochodzeniu nie tylko do zdolności jakościowej, ale też technologicznej i ilościowej, i planują odpowiedni okres czasu na te działania. Chociaż oczywiście później podczas normalnej produkcji również co jakiś czas przeprowadza się różne analizy oraz optymalizuje produkcję. Najczęściej zatrudnia się w tym celu kompetentne, doświadczone osoby z koncernu lub firmy inżynierskie z zewnątrz.

Przedstawione wybrane problemy zarządzania jakością pokazują, z jakimi problemami muszą mierzyć się projektanci we współczesnych dużych fabrykach, w których realizowana jest produkcja wielkoseryjna. Zagadnienia zarządzania jakością są bardzo obszerne, są one względnie dobrze opisane w literaturze technicznej, zwłaszcza teoretycznie. Brakuje jednak wzorców praktycznych, zwłaszcza dla mniejszych firm i dla systemów bardziej skomplikowanych niż popularne zarządzanie jakością wg ISO 9000 i innych norm ISO. Co prawda w dużych koncernach wypracowano i dopracowano szereg procedur jakościowych, jednak nie są one rozpowszechniane (z wiadomych względów)

Przebieg procesu	Charakterystyka procesu	Przyczyny
	<b>Przebieg ustabilizowany</b> 2/3 wszystkich wartości leży w obszarze $\pm$ odchylenia standardowego i wszystkie wartości leżą pomiędzy granicami koniecznej tolerancji.	Proces jest pod kontrolą i może być dalej prowadzony bez konieczności tolerancji.
	<b>Przekroczone granice tolerancji</b> Wartości wychodzą ponad lub leżą poniżej granic tolerancji.	Złe ustawienie maszyny, zróżnicowane partie materiału, uszkodzenie maszyny. Należy ingerować w proces, a wytwarzane części po ostatniej próbie wyrywkowej poddać 100% kontroli.
	<b>Seria</b> 7 lub więcej kolejno zmierzonych wartości leży po jednej stronie linii środkowej.	Zużycie narzędzia, inna partia materiału, nowe narzędzie, zmiana personelu. Należy zostrzyć nadzorowanie procesu.
	<b>Trend</b> 7 lub więcej kolejno zmierzonych wartości wykazuje tendencję wzrostową lub malejącą.	Zużycie narzędzia, przyrządów lub narzędzi pomiarowych, zmęczenie personelu. Należy przerwać proces w celu zbadania przyczyny.
	<b>Tercja środkowa (Middle Third)</b> Co najmniej 15 kolejnych wartości leży w granicach $\pm$ odchylenia standardowego s.	Ulepszony proces obróbki, lepszy nadzór, fałszowane wyniki pomiarowe. Należy stwierdzić co spowodowało poprawę procesu, lub skontrolować wyniki pomiarów.
	<b>Okresowość</b> Wartości zmieniają się okresowo względem linii środkowej.	Różne przyrządy pomiarowe, systematyczne dzielenie danych. Należy sprawdzić możliwości wpływu ze strony procesu obróbki.

Tab. 1 Rodzaje przebiegów procesu pod względem jakości

poza koncern. Pozostaje zatem dopracowywanie własnych doświadczeń. Uniknąć tych działań w obecnej rzeczywistości przemysłowej jednak się już nie da.

Aleksander Łukomski

#### Bibliografia:

- B. Zwolińska: *Analiza utrzymania założonego poziomu jakości*, Autobusy : technika, eksploatacja, systemy transportowe, t. 17, nr 6, 2016
- Poradnik mechanika*, wydawnictwo REA
- T. Greber: *Badanie zdolności procesu – niebezpieczne wskaźniki*, Zarządzanie jakością, Kraków 2005
- A. Iwasiewicz: *Zarządzanie jakością*, PWN, Warszawa 1999
- Politechnika Koszalińska, *Monitorowanie procesów wytwarzania. Ocena zdolności jakościowej procesów*, Koszalin 2018
- M. Rydzewska-Włodarczyk i in.: *Pomiar efektywności procesów za pomocą kluczowych wskaźników efektywności*, Zeszyty Naukowe nr 864, Uniwersytet Szczeciński, Szczecin 2015