MODUŁ IV

Zmienność w procesach i jej odmiany. Podstawy statystycznego nadzorowanie procesów. Zdatność jakościowa procesu. Elementy koncepcji Six Sigma

Zmienność w procesach

Zmienność jest naturalnym zjawiskiem związanym z realizacją procesów. Zmienność jest przyczyną niejednorodności wytwarzanych dóbr, sprawia że niemożliwe jest uzyskanie dwóch takich samych wyrobów, mimo, że przedsiębiorstwo dokłada starań by identyczność taką zapewnić.

Zmienność jest wynikiem występowania dwóch rodzajów przyczyn:

- **nielosowych**, zwanych też często systematycznymi, istotnymi bądź specjalnymi, które można określić, ustalić a przez to i wyeliminować;
- **losowych, przypadkowych**, zwanych często chronicznymi, uwarunkowanych przez szereg, zwykle mało znaczących czynników, których zidentyfikowanie jest bardzo trudne, niemożliwe lub ekonomicznie nieuzasadnione.

Przyczyny systematyczne wpływają na **dokładność** procesu (tzw. wyśrodkowanie), a przypadkowe określają jego **precyzję** (rozproszenie wyników).

Warunkiem koniecznym uzyskiwania w produkcji wyrobów zgodnych z podanymi w projekcie wymaganiami jest, **stabilność procesu**. Proces stabilny to taki, w którym **zmienność jest wynikiem przyczyn przypadkowych**, powodujących drobne zmiany, a nie przyczyn specjalnych, powodujących istotne zmiany wartości parametrów. Zadaniem producenta jest, w pierwszej kolejności, ograniczenie przyczyn zmienności wyłącznie do przyczyn przypadkowych, a następnie stopniowa ich redukcja poprzez doskonalenie procesów.

Redukcja wpływu przyczyn przypadkowych jest znacznie trudniejsza niż eliminacja przyczyn systematycznych, wymaga bowiem dokonania "przełomu" w procesie, jak np. zakup nowych urządzeń, lepszych materiałów, technologii, dobór kadr itp.. Stwierdzono, że u źródła około 85% problemów spotykanych w produkcji, leżą przyczyny przypadkowe. Kadra kierownicza powinna zdawać sobie sprawę, że gdy stosowane metody sterowania jakością, doprowadzą do sytuacji, że dany proces osiągnie stan stabilności statystycznej (wyeliminowane zostaną przyczyny wyznaczalne) ich następnym, znacznie bardziej złożonym zadaniem będzie przeciwdziałanie i ciągłe zmniejszanie wpływu przyczyn przypadkowych (jedna z naczelnych zasad zarządzania jakością - ciągłe doskonalenie).

Współczesne systemy jakości, w tym również ich modele opisane w normach ISO serii 9000, jako główne cele przyjmują:

- **eliminację wyznaczalnych, systematycznych przyczyn błędów** popełnianych w różnych dziedzinach działalności przedsiębiorstwa, np. poprzez zapewnienie odpowiednio wykwalifikowanej kadry, nadzorowanie infrastruktury technicznej, oznakowanie i odseparowanie wyrobu niezgodnego z wymaganiami;

- **identyfikację i sterowanie przyczynami przypadkowymi,** np. nadzorowanie procesu produkcji lub realizacji usług, walidację tzw. procesów specjalnych, monitorowanie i pomiary.

Zmienność losowa charakteryzująca wyniki określonych działań, jak wcześniej wspomniano jest rezultatem złożonego systemu wzajemnie odziaływujących elementów takich jak kadry, infrastruktura techniczna, środowisko pracy, wykorzystywane materiały, metody realizacji procesów czy też sposoby ich monitorowania (pomiarów). Stąd też na niepożądany stan zmienności przypadkowej (losowej) wpływają m.in.:

- niewłaściwa obsługa i konserwacja urządzeń,
- niewłaściwy dobór urządzeń do żądanej dokładności wykonania,
- zła jakość narzędzi produkcyjnych,
- zła jakość sprzętu pomiarowego,
- wadliwy lub nieodpowiedni materiał,
- brud, hałas, drgania, nieodpowiednia temperatura, niewłaściwe oświetlenie, itp.

Najważniejsze nielosowe, wyznaczalne przyczyny zmienności to przykładowo:

- zmiana operatora,
- zmiana jakości materiału obrabianego,
- zmęczenie operatora,
- zmiana sprzętu pomiarowego,
- zużywanie się narzędzia,
- niewykalibrowany sprzęt pomiarowy, itp.

Dwaj spośród grona najczęściej wymienianych twórców współczesnej inżynierii jakości - W. E. Deming oraz J. M. Juran - w wielu swoich publikacjach traktowali zmienność występującą w procesach, jako zasadniczy czynnik wpływający na jakość oferowanych wyrobów lub usług.

Deming uczynił teorię zmienności jednym z czterech filarów tzw. systemu gruntownej wiedzy menedżerskiej *(ang. system of profound knowledge).* Twierdził on, że prawidłowa ocena współzależności pomiędzy poszczególnymi elementami systemu odpowiednio powiązanych i nadzorowanych procesów wymaga od kierownictwa zrozumienia i znajomości podstaw zmienności charakteryzującej te procesy. W szczególności istotne jest:

- zrozumienie istoty **losowych** oraz **specjalnych** przyczyn zmienności w procesie;

- zrozumienie faktu, że **zmienność jest zjawiskiem nieuniknionym we wszelkich procesach**;
- możliwość stwierdzenia różnicy pomiędzy stanem stabilności a niestabilności statystycznej procesu;
- świadomość możliwości popełnienia błędów polegających na:
  - potraktowaniu przyczyny losowej jako specjalnej (np. ukaranie pracownika za wyniki, na które zasadniczy wpływ ma system – zmienność losowa- a nie sam ten pracownik),
  - potraktowaniu przyczyny specjalnej jako losowej;
- wychwycenie zasadniczego celu stosowania kart statystycznego sterowania procesami, czyli umiejętność wskazania źródła problemu – czy jest on wynikiem oddziaływania systemu – zmienność losowa, czy też istotnego wpływu jednego z elementów tego systemu, np. człowieka czy też materiału – przyczyna specjalna;
- rozróżnienie pomiędzy systemem stabilnym a zdatnym jakościowo, gdyż proces może być stabilny, ale mieć nieodpowiednią zdatność jakościową i odwrotnie.

Metody i narzędzia inżynierii jakości wspierają działania, których celem jest doskonalenie we wszystkich fazach cyklu istnienia produktu. Zasadniczą rolę wśród tych metod pełnią narzędzia wykorzystujące podejście statystyczne.

Główne zalety stosowania podejścia statystycznego w zarządzaniu jakością to:

- większa efektywność ekonomiczna, w stosunku do kontroli pełnej, która mimo wysokich kosztów realizacji nie daje całkowitej pewności poprawnych decyzji,
- mniejsze zużycie sprzętu pomiarowo - kontrolnego,
- możliwość podjęcia szybkich, popartych racjonalnymi argumentami, decyzji co do korygowania parametrów wyrobu i procesów,
- możliwość określania konkretnych parametrów statystycznych z ustalonymi prawdopodobieństwami;
  - odrzucenia hipotezy o wartości danego parametru statystycznego, np. wartości średniej, gdy jest ona prawdziwa - **ryzyko producenta, błąd pierwszego rodzaju α**,
  - przyjęcia hipotezy, gdy jest ona fałszywa, np. przyjęcie partii wyrobów o zbyt dużej wadliwości - **ryzyko nabywcy, błąd drugiego rodzaju β,**
- możliwość zastosowania szeregu technik, a szczególnie zbierania i prezentacji danych do procesów nie związanych koniecznie z produkcją seryjną (usługi).

Istotą statystycznych metod oceny jakości jest możliwość wnioskowania i stawiania prognoz dotyczących jakości partii wyrobu lub danego procesu, na podstawie reprezentatywnej próbki, czyli takiej, która jest możliwie najwierniejszym obrazem populacji generalnej (partii). Aby to zapewnić próbka musi być losowa, tzn. pobierana w sposób jak najbardziej przypadkowy, pod względem czasu i lokalizacji. Nigdy jednak nie można mieć pewności, że próbka idealnie reprezentuje całą partię. Można natomiast taką nieuniknioną niepewność określić. Warto również pamiętać o oczywistym z pozoru fakcie, że im liczniejsza jest badana próbka, tym większa jej wiarygodność jako "obrazu" całej populacji.

Ekonomiczne uzasadnienie wyboru kontroli wyrywkowej (statystycznej) w stosunku do kontroli stuprocentowej (pełnej), wymaga porównania kosztów łącznych związanych z tymi metodami. Założywszy, że nie zdarzają się błędy przy kontroli, można określić koszt kontroli stuprocentowej K_p:

$$K_p = N\,k \qquad (1)$$

oraz wyrywkowej K_w:

$$K_w = nk + (N-n)\,w * S \qquad (2)$$

gdzie: N - liczba sztuk w partii,

n - liczba sztuk w próbce z tej partii,

w - wadliwość partii,

k - koszt kontroli jednej sztuki,

S- strata spowodowana nie wychwyceniem wadliwego wyrobu przez kontrolę .

Przyrównując do siebie wyrażenia (1) i (2), można określić **graniczną wadliwość w_g** , przy której zachodzi równość kosztów kontroli stuprocentowej i wyrywkowej :

$$w_g = \frac{k}{S} \qquad (3)$$

Gdy przewidywana wadliwość partii jest mniejsza od w_g, ekonomicznie uzasadnione będzie stosowanie kontroli statystycznej, gdy większa - stuprocentowej. W wyborze tym niezwykle istotna jest stabilność poziomu jakości partii. Weryfikację stabilności procesu można przeprowadzić stosując narzędzia opisane w dalszej części skryptu – karty kontrolne .

Rodzaje cech jakościowych oraz ich modele statystyczne

Cechy, parametry wykorzystywane do określenia jakości wyrobu lub procesu można podzielić na:

- **wynikające z oceny liczbowej (pomiaru)** - czyli parametry zmieniające się według funkcji ciągłej, mogące przyjmować w danym przedziale liczbowym dowolną wartość. Są to np. wymiary wyrobów, ciężar, własności mechaniczne materiałów, zużycie paliwa, rezystancja elementów elektronicznych itp.;
- **wynikające z oceny atrybutywnej**, np. przypisanie stanów - zgodny/niezgodny lub jest/nie ma (sprawdziany), oceniane według odpowiednio przyjętej skali np. skali Likert'a- bardzo dobry(5) – dobry(4) – średni(3) – zły(2) - bardzo zły(1).

W tablicy 1 podano charakterystykę metod zapewnienia jakości opartych na analizie obu wymienionych rodzajów cech.

Tablica 1

Wady i zalety wynikające z zastosowania dwóch rodzajów cech analizowanych obiektów

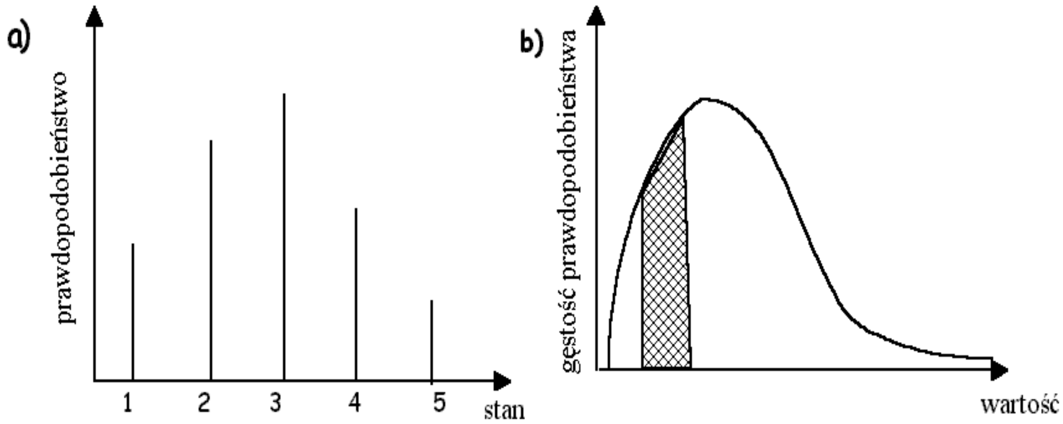
	Cechy liczbowe	**Cechy atrybutywne**
Wady	- skomplikowane metody pomiaru, -trudności interpretacyjne w analizie statystycznej, - znaczny wpływ postępowania pomiarowego na wynik analizy, - brak praktycznej możliwości oceny jakości wyrobu jako funkcji wielu parametrów.	- większe próbki niż dla cech mierzalnych, - trudność w odniesieniu do parametrów procesu/ maszyny, - brak informacji o poszczególnych parametrach wyrobu, - trudność w określaniu właściwych środków zaradczych.
Zalety	- możliwość analizy poszczególnych parametrów wyrobu, - możliwość odniesienia spostrzeżeń do odpowiednich parametrów (czynników) procesu, a przez to możliwość ich regulacji, - mniejsza liczebność próbki niż w przypadku cech atrybutywnych, - możliwość oceny zdatności jakościowej procesów.	- niski koszt badań (oceny), - prostota badań, a przez to brak konieczności zatrudnienia wykwalifikowanej kadry, - ogólna ocena danego zadania (a nie tylko poszczególnych parametrów), - łatwiejsza interpretacja wyników.

Rozkład prawdopodobieństwa przedstawia zależność prawdopodobieństwa występowania wartości/stanów danej cechy od tych wartości.

Są dwa rodzaje rozkładów:

1) **Dyskretne, nieciągłe** (rys.2a) dla cech alternatywnych, atrybutywnych, niemierzalnych takich, jak np. liczba wyrobów wadliwych w próbce, liczba wad występujących w określonej jednostce wyrobu, przyjmujących wartości ze skali skokowej.

1) **Ciągłe** (rys.2 b) - dla cech mierzalnych, na podstawie których można określić prawdopodobieństwo, że dana cecha będzie przyjmowała wartości z pewnego przedziału - nie można tu mówić o prawdopodobieństwie wystąpienia jakiejś ściśle określonej wartości.



Rys. 2. Przykłady rozkładu zmiennej losowej dyskretnej (a) i ciągłej (b)

Najszersze zastosowanie w praktyce znajduje rozkład Gauss'a, inaczej zwany normalnym. Spotyka się go, gdy na wartość rozpatrywanej cechy, ma wpływ wiele drobnych, przypadkowych (losowych) przyczyn, z których każda wywiera podobny, niewielki wpływ.

Równanie rozkładu normalnego N(μ, σ) zmiennej losowej x, jest następujące:

$$f(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{x-\mu}{\sigma}\right)^2} ; \quad -\infty < x < \infty; \qquad \sigma^2 > 0 \qquad (4)$$

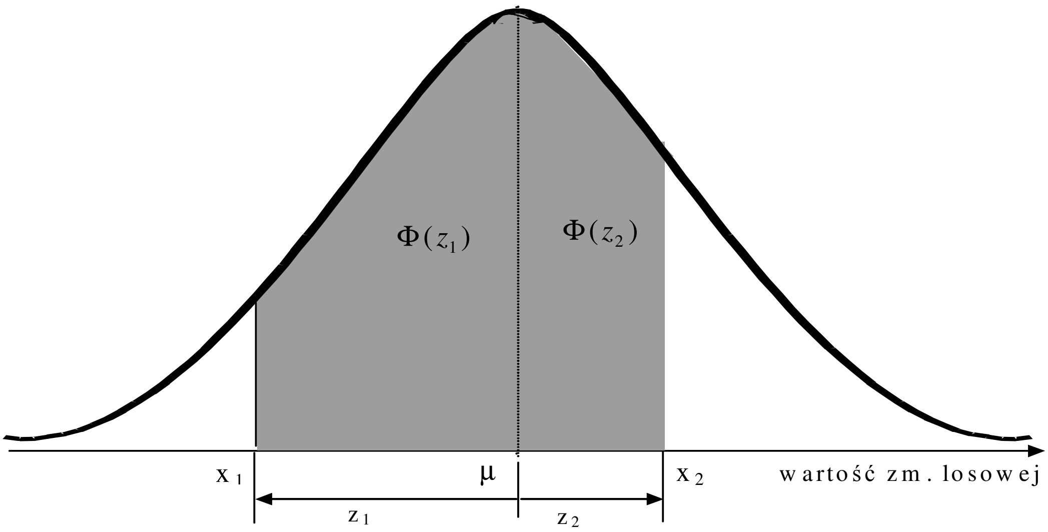
gdzie: μ - średnia populacji generalnej,

σ - odchylenie standardowe populacji generalnej.

Prawdopodobieństwo, że zmienna losowa x (np. wymiar, masa, naprężenie) znajduje się w granicach od x_1 *do* x_2, określa się poprzez obliczenie pola pod krzywą normalną - całki Laplace'a – rys.3, wykorzystując przy tym pojęcie zmiennej standaryzowanej

$$\Phi(x_1 < x < x_2) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \int_{z_1}^{z_2} e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{x-\mu}{\sigma}\right)^2} dx \qquad (5)$$

gdzie: $z = \dfrac{x-\mu}{\sigma}$ - tzw. zmienna standaryzowana (6)



Rys.3. Interpretacja pola pod krzywą normalną (całka Laplace'a) jako prawdopodobieństwa przyjęcia przez cechę *x* wartości w przedziale $(x_1;x_2)$ z uwzględnieniem zmiennej standaryzowanej z

Całki $\Phi(z_1)$ i $\Phi(z_2)$ oznaczają pola zawarte pod krzywą normalną i ograniczone osią odciętych i rzędnymi x_1 i x_2.

W celu praktycznego znalezienia powierzchni pod krzywa normalną, odpowiadającej procentowi wyrobów, dla których wartość badanego parametru znajduje się w wybranym przedziale, np. tolerancji należy:

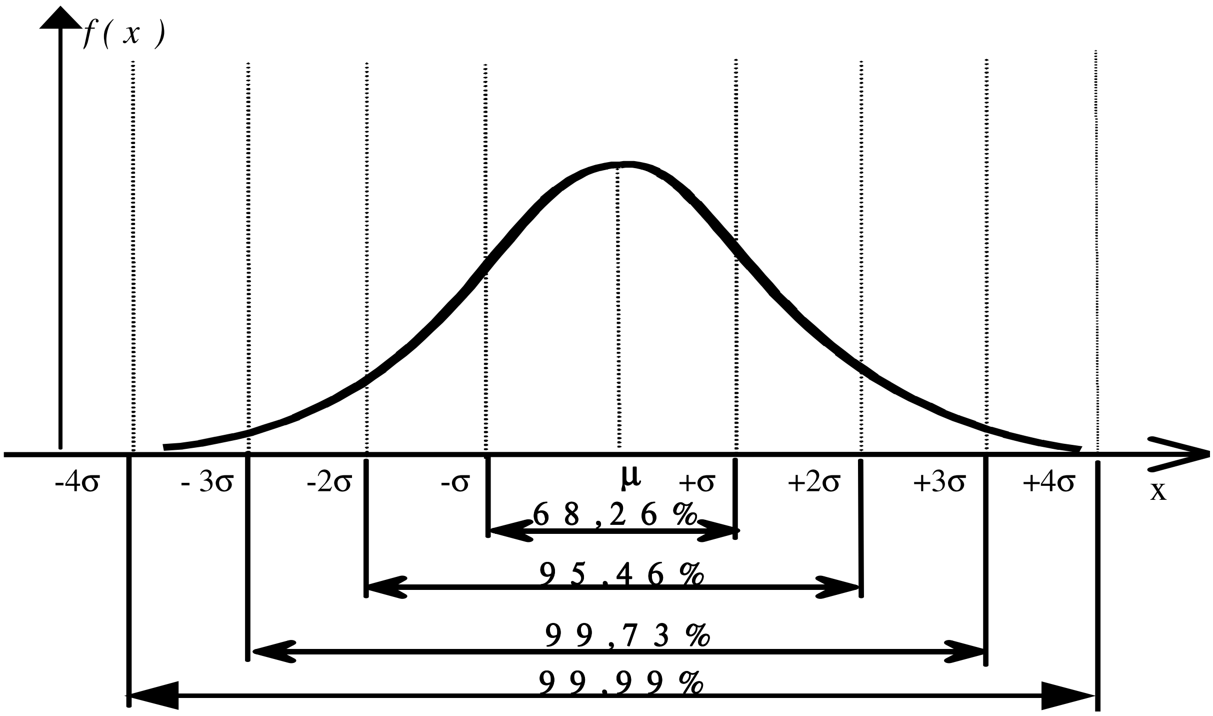
- obliczyć zmienną standaryzowaną (wzór 6) dla obu granic przedziału analizowanej cechy, wyrażającą odległość wartości *x,* np. granicy tolerancji, od średniej w populacji jako wielokrotność odchylenia. standardowego;
- korzystając z tabel z wartościami funkcji Φ(z) rozkładu normalnego, odczytać wartość Φ odpowiadającą wartościom zmiennej standaryzowanej *z* dla obu granic rozpatrywanego przedziału;
- obliczyć łączną powierzchnię pod krzywą normalną (sumę $\Phi(z_1)$ i $\Phi(z_2)$), czyli prawdopodobieństwo, że wartość danego parametru znajduje się w badanym przedziale.

Ponieważ krzywa normalna jest symetryczna względem osi przechodzącej przez jej wierzchołek (średnią μ), dlatego oczywiste jest, że pole pod krzywą normalną po obu stronach wartości średniej jest równe 0.5. Ma to znaczenie wówczas, gdy należy określić prawdopodobieństwo, że wartość jakiegoś parametru jest ograniczona jednostronnie. Należy również pamiętać, że

$$\Phi(-z) = -\Phi(z) \tag{7}$$

Równanie 5 ma duże znaczenie w ocenie poziomu jakości wykonania wyrobów. Umożliwia bowiem oszacować, jaka część partii wyrobów spełnia (bądź nie spełnia) wymagania odnośnie do danego parametru, tzn. jego tolerancji wykonawczych.

Na rysunku 4 przedstawiono rozkład normalny i podano powierzchnie pod krzywą gęstości tego rozkładu, w zależności od charakterystycznych odległości od średniej μ, liczonych jako krotności odchylenia standardowego σ.



Rys. 4. Właściwości rozkładu normalnego

Znaczenie rozkładu normalnego jest tak duże, ponieważ można przy jego pomocy nie tylko aproksymować wiele innych rozkładów, ale również ze względu na fakt, że rozkład średnich arytmetycznych próbek z populacji (co najmniej 4-elementowych), nie podlegającej rozkładowi Gaussa, do tego rozkładu dąży - zgodnie z tzw. centralnym twierdzeniem granicznym.

Należy wskazać na niezwykle istotną w metodach statystycznych, szczególnie w praktyce kart kontrolnych, zależność, pomiędzy odchyleniem standardowym σ wartości indywidualnych w pewnej populacji a odchyleniem standardowym σ_X rozkładu wartości średnich z próbek n - elementowych, pobranych z tej populacji

$$\sigma_x = \frac{\sigma}{\sqrt{n}} \tag{8}$$

Wynika stąd, że im liczniejsze są próbki pobierane z badanej populacji, tym "smuklejszy"(o mniejszym rozrzucie) jest rozkład wartości średnich tych próbek, w stosunku do rozkładu wartości indywidualnych analizowanego parametru.

Wśród rozkładów zmiennych losowych dyskretnych w metodach inżynierii jakości najczęstsze praktyczne zastosowanie znajdują rozkład dwumianowy (Bernoulli'ego) i rozkład Poisson'a.

Rozkład dwumianowy reprezentuje liczbę *r* sukcesów w *n* próbach. W praktyce rozkład ten wykorzystuje się m.in. w analizie wadliwości (frakcji sztuk wadliwych) procesów produkcji. Prawdopodobieństwo, że przy *n* kolejnych próbach, dane zdarzenie zajdzie *r* razy a nie zajdzie *n-r* razy, przy czym kolejność zajścia tych zdarzeń jest obojętna, wynosi

$$P(r,n,p) = \binom{n}{r} p^r (1-p)^{n-r} \tag{9}$$

gdzie: *p*- prawdopodobieństwo zajścia jakiegoś zdarzenia przy jednej próbie (odpowiada np. znanej wadliwości badanej partii).

Należy zaznaczyć, że w rozkładzie dwumianowym zdarzenia muszą być wzajemnie niezależne, czyli jeśli np. wybieramy losowo kolejne wyroby z partii, to powinny być one zwracane z powrotem do tej partii. W przypadku losowania bezzwrotnego, odpowiednim modelem jest rozkład hipergeometryczny, który różni się od rozkładu dwumianowego tylko przy dużych licznościach próbki w stosunku do liczności partii. Przy kontroli statystycznej przypadki takie zachodzą rzadko, dlatego rozkład dwumianowy jest wystarczająco dokładny nawet przy próbach bezzwrotnych.

Przykład

Wadliwość dużej partii wynosi 10%. Jakie jest prawdopodobieństwo znalezienia 2 braków w 10 próbach?

Rozwiązanie

$$P(2,10,0,1) = \frac{10!}{2!8!}\ (0,1)^2 (0,9)^8 = 0,194$$

Gdy liczba powtórzeń próby jest stosunkowo duża (*n* >20) a prawdopodobieństwo *p* zdarzenia w każdej próbie małe (< 0.05), przy czym $np = \lambda$, *r* – liczba sukcesów w próbie, to wyrażenie (9) można przedstawić jako

$$P(r,\lambda) = \frac{\lambda^r}{r!} e^{-\lambda} \tag{10}$$

Równanie (10) przedstawia rozkład Poissona.

Rozkład Poissona jest często nazywany rozkładem rzadkich zdarzeń (małe prawdopodobieństwo *p)* albo prawem małych liczb. Rozkład Poissona jest wykorzystywany do tworzenia kart kontrolnych **liczby wad w próbce** (jednostce wyrobu, długości, objętości itp.). Przykładami cech podlegających rozkładowi Poissona są: liczba wad na danej powierzchni lub długości arkusza blachy, liczba pęcherzyków powietrza zatopionych w naczyniu szklanym, liczba wadliwych spoin punktowych na powierzchni konstrukcji spawanej, liczba wadliwych nitów w skrzydle samolotu, liczba błędów popełnionych w trakcie wypełniania formularza itp.

Statystyczne sterowanie procesami

Statystyczne sterowanie procesami (ang. *Statistical Process Control* - **SPC**), jest zbiorem technik wykorzystywanych w celu diagnozowania, analizy i doskonalenia procesów. SPC umożliwia rozwiązywanie problemów, dzięki odpowiednim metodom diagnostycznym służącym do lokalizacji nieprawidłowości oraz technikom opisowych, pomagającym te problemy lepiej zrozumieć.

Dzięki stosowaniu SPC można stwierdzić, że proces jest stabilny, sterowalny, gdy zmienność w procesie jest wynikiem **wyłącznie przyczyn przypadkowych**, lub też niestabilny, gdy w procesie występują systematyczne przyczyny zmienności. Stąd też metody SPC szczególne zastosowanie znajdują w sferze produkcji wyrobów/realizacji usług.

Cztery główne **e**tapy w stosowaniu metod SPC to:

1) zbieranie danych,

2) ustanowienie celów, wzorców - np. linii regulacji na kartach kontrolnych,

3) porównanie stanu rzeczywistego z wzorcami (pomiar, ocena), wskazanie systematycznych i przypadkowych przyczyn zmienności,

4) podjęcie działań korygujących.

Techniki stosowane w ramach SPC są tylko wtedy skuteczne, gdy:

- są stosowane do bieżącej analizy procesu, a nie jak w przypadku kontroli odbiorczej na jego końcu, gdy jest już za późno by zapobiec powstałym nieprawidłowościom,

- są wykorzystywane przez osoby najlepiej znające dany proces (jego fragment),

- dane wykorzystywane do analizy są autentyczne i aktualne,

- prezentacja danych dotyczących procesu przyjmuje formą graficzną, stanowiącą sugestywny "obraz procesu".

Podstawowe metody i techniki statystyczne wykorzystywane w ramach SPC, można, w dużym uproszczeniu, podzielić na cztery grupy:

1) **graficzna prezentacja problemu :**

- histogramy,

- wykresy Pareto - Lorenza,

- wykresy Ishikawy,

2) **analiza korelacji i regresji**,

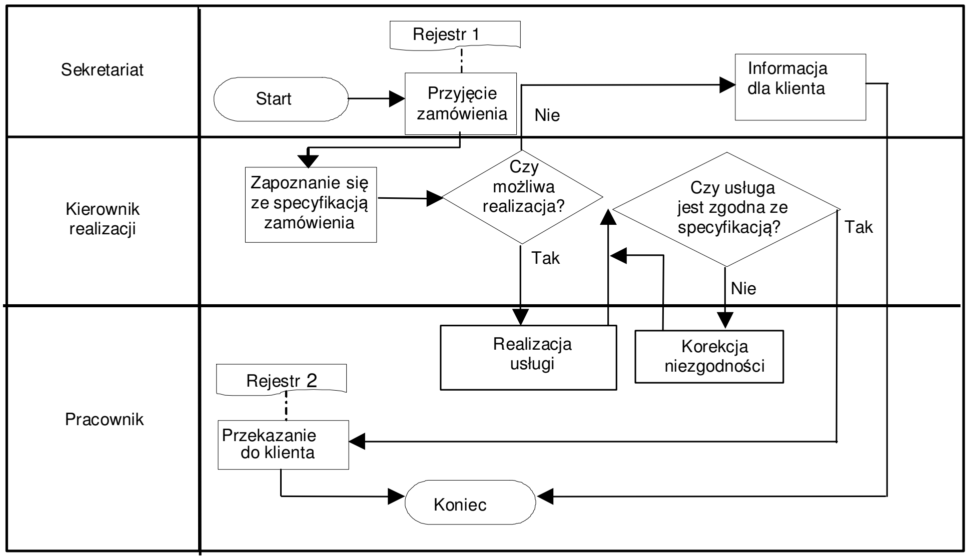
3) **karty kontrolne Shewharta** (od nazwiska twórcy):

- cech liczbowych,

- cech wynikających z oceny alternatywnej,

4)**analiza zdatności jakościowej procesu.**

W zestawie podstawowych metod SPC, podawane są także często schematy blokowe (diagramy procesu – rys.5), które umożliwiają proste i sugestywne przedstawienie przebiegu procesu oraz arkusze (formularze) do zbierania i grupowania danych.



Rys. 5 Przykład diagramu procesu

Histogramy

Są to wykresy słupkowe przedstawiające rozkład częstotliwości występowania analizowanych danych liczbowych ciągłych lub o charakterze dyskretnym. W celu skonstruowania histogramu należy postępować w następujący sposób:

1) określić niezbędną ze względu na stawianie rzetelnych prognoz wielkość próbki n,

2) znaleźć największą i najmniejszą wartość obserwacji,

3) obliczyć rozstęp R (największa minus najmniejsza wartość),

4) określić liczbę N i szerokość Δ przedziałów, korzystając z następujących zasad:

- stosować od 6 do 15 przedziałów,
- przedziały powinny mieć równą szerokość,
- jako regułę można przyjąć, że liczba przedziałów N=1+3.3 log n lub N=$\sqrt{n}$,
-wybrać jako dolną granicę pierwszego przedziału wartość nieco mniejszą niż stwierdzona najmniejsza wartość wśród danych,
- szerokość przedziału wynosi $\Delta = \frac{R}{N}$,

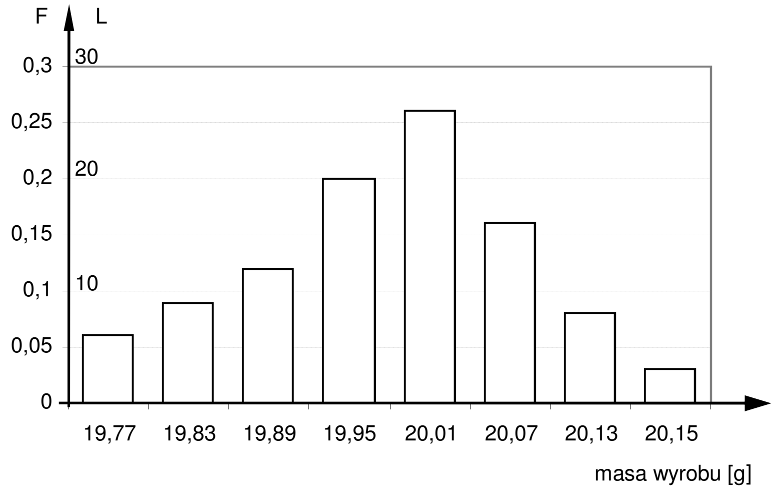
5) określić liczbę L danych zawartych w poszczególnych przedziałach,

6) obliczyć częstość F występowania w poszczególnych przedziałach: $F = \frac{L}{n}$,

7) sporządzić histogram (przykład – rys.6), w którym pionowe słupki odpowiadają częstości F (ew. liczności L) dla określonych przedziałów wartości rozpatrywanej cechy.

Powyższy sposób postępowania może być po pewnych modyfikacjach zastosowany do prezentacji danych dyskretnych.

Oczywiście użycie odpowiedniego oprogramowania komputerowego umożliwia zautomatyzowanie opisanych czynności.



Rys. 6. Przykład histogramu

Interpretując histogram należy zadać sobie następujące pytania:

1) Czy i w jakim stopniu wyniki procesu znajdują się w obrębie tolerancji i jak jest on wycentrowany (w jakiej odległości od środka tolerancji znajduje się średnia arytmetyczna wyników procesu) ?

2) Czy proces charakteryzuje się dużą zmiennością (czy histogram jest „smukły" czy „rozłożysty") ?

3) Jaki jest kształt histogramu? Jeśli kształt histogramu jest znacząco niesymetryczny, może to oznaczać, że w procesie, z którego pochodzą wyniki poddane analizie, występuje istotny czynnik zakłócający.

Histogram może służyć do przybliżonej weryfikacji normalności rozkładu (kształt powinien przypominać symetryczną krzywą Gaussa) oraz ocenie zdolności jakościowej procesu, w przypadku naniesienia granic tolerancji. Należy jednak pamiętać, że bez oceny stabilności procesu (za pomocą kart kontrolnych) wnioski płynące z analizy histogramu mogą być mylące.

Wykresy Pareto - Lorenza

Wykresy te są używane w celu identyfikacji i oceny istotności stwierdzonych nieprawidłowości. Analiza Pareto - Lorenza znana jest także jako prawo "20-80", prawo nierównomierności rozkładu czy metoda ABC. Metoda ta pozwala określić te **czynniki, które pomimo, że są w mniejszości, w stosunku do ogólnej liczby wszystkich czynników** (stanowią tylko około **20%** ogólnej liczby czynników)**, to wywierają dominujący wpływ** (stanowiący około **80%** ogólnego efektu) na rozpatrywane zagadnienie - np. wzrost liczby reklamacji, spadek liczby nowych klientów, czas obróbki, koszty braków wewnętrznych itp.

Popularność tej prostej i skutecznej metody, zawdzięczamy przede wszystkim amerykańskiemu ekspertowi J. Juranowi. Dzięki jego pracom i sukcesom wdrożeniowym, wykresy Pareto-Lorenza stanowią obecnie jedno z najważniejszych narzędzi w procesie doskonalenia jakości stosowanych na świecie.

Procedura przeprowadzania analizy Pareto-Lorenza sprowadza się do:

1) identyfikacji rodzajów kategorii wpływających na rozpatrywane zagadnienie (np. rodzajów problemów wpływających na powstanie braków produkcyjnych),

2) określenia przedziału czasowego (dzień, zmiana, rok itp.) w celu późniejszego porównywania efektów wprowadzonych zmian,

3) ustalenia wartości (nasilenia) występowania poszczególnych kategorii wpływających na badany problem (np. jakie straty na brakach były związane z niewłaściwą jakością użytego materiału, kwalifikacjami operatorów, uszkodzeniami w trakcie transportu wewnętrznego itp.),

4) uszeregowania tych kategorii od największej do najmniejszej wartości, obliczenia udziałów procentowych i skumulowanych,

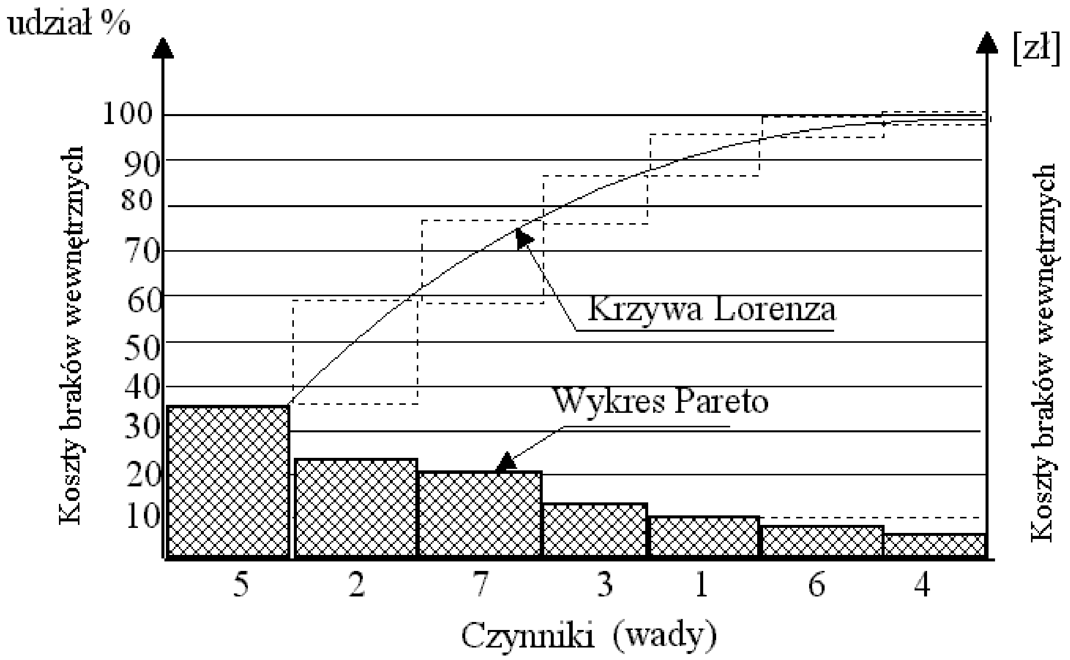
5) ustalenia skal na osi pionowej, najczęściej przyjmuje się bezwzględną wartość – np. koszt braków wewnętrznych związanych z daną przyczyną oraz udział procentowy a także poziomej (kategoria problemu),

6) naniesienia na wykres słupków odpowiadających wartościom (udziałom procentowym) dla poszczególnych kategorii przyczyn (wykres Pareto) i krzywej dla procentów skumulowanych (krzywa Lorenza) - w kolejności od największego do najmniejszego nasilenia oddziaływania.

Metoda ta służyć może nie tylko wskazaniu najważniejszych źródeł problemów, ale również prezentacji rezultatów działań korygujących w danej dziedzinie. Umieszcza się wówczas obok siebie dwa wykresy - przed i po podjęciu działań naprawczych, używając oczywiście tych samych skal i rodzajów danych.

Dane do wykresu Pareto-Lorenza powinny być zestawione w tabeli, zawierającej kolumny odpowiadające nazwom (symbolom) poszczególnych kategorii (np. nazwy przyczyn wad), bezwzględnej wartości występowania lub nasileniu oddziaływania np. liczba wad danego typu w przedziale czasowym, procentowemu udziałowi w rozpatrywanym zagadnieniu (np. procent wad danego typu w ogólnej liczbie wad) oraz procentom skumulowanym.

Na rysunku 7 podano przykłady wykresu Pareto-Lorenza do analizy wpływu kilku rodzajów wad, oznaczonych numerami 1-7, na stwierdzone w firmie koszty braków wewnętrznych.



Rys. 7. Przykład wykresu Pareto-Lorenza

Wykresy Ishikawy

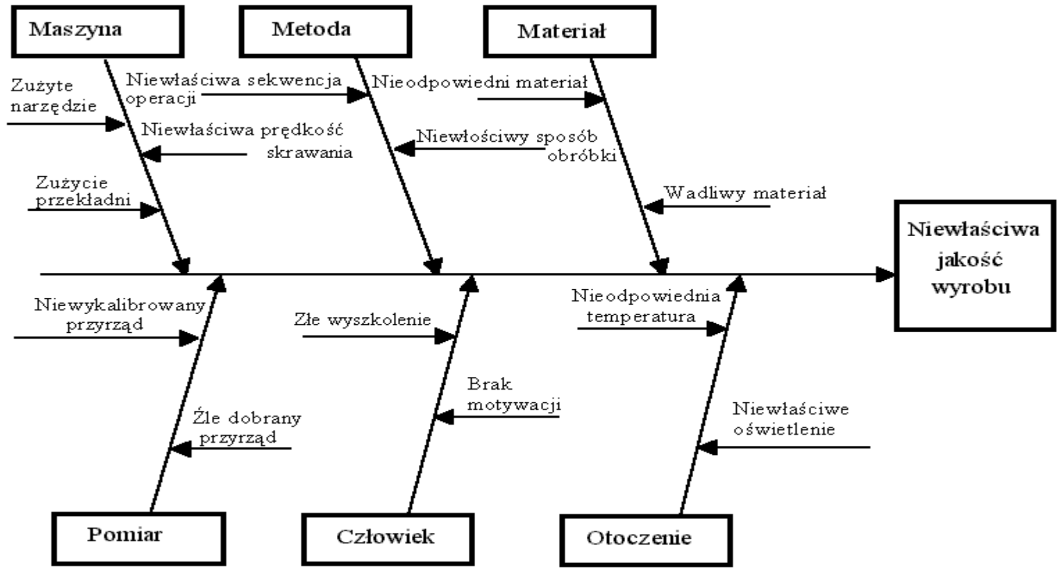
Technika ta wzięła swą nazwę od japońskiego specjalisty z dziedziny jakości – Kaoru Ishikawy. Inne spotykane nazwy to: **wykresy przyczynowo-skutkowe** czy **wykresy rybiego szkieletu** (ang. *fishbone diagram*).

Celem wykorzystania tej metody jest prezentacja przyczyn składających się na rozpatrywany rezultat. Na końcu osi poziomej, podawany jest rozpatrywany skutek jakiegoś działania, procesu, systemu (np. zbyt długi czas realizacji zlecenia, częste reklamacje dotyczące usługi X), a na gałęziach ("ościach") - przyczyny. W zależności od potrzeb i złożoności problemu, wykresy te mogą ujmować kilka poziomów szczegółowości przyczyn (hierarchię).

Wykres Ishikawy powinien być opracowywany przez grupę osób reprezentujących różne dziedziny związane z badanym zagadnieniem. Dlatego też najbardziej wskazaną przy opracowywaniu tych wykresów jest sesja **burzy mózgów**. Chodzi o to, by zgłaszanie propozycji dotyczących rozpatrywanego zagadnienia, miało nieskrępowany, merytorycznie i organizacyjnie efektywny charakter. Eliminacja i wybór właściwych czynników, powinny być dokonane zespołowo, co zagwarantuje właściwe wykorzystanie w praktyce. Burza mózgów może przyjmować różne formy. Jedną z nich jest metoda grup nominalnych, w której po zgłoszeniu propozycji dotyczących danego zagadnienia, każdy z uczestników sesji dokonuje wyboru pewnej liczby czynników najistotniejszych (np. ośmiu) oraz punktuje ich ważność, ustalając w ten sposób priorytety działań.

Przyczyny badanego problemu mogą być grupowane w oparciu o zasadę **5 M** (ang. *Men* (ludzie), *Methods* (metody), *Machines* (maszyny, urządzenia), *Materials* (materiały), *Measurements* (pomiary)) – czyli w odniesieniu do podstawowych czynników wpływających na wyniki działań. Można oczywiście w zależności od specyfiki problemu wskazać dodatkowe kategorie przyczyn.

Przykładowy wykres przyczynowo- skutkowy przedstawia rys. 8.



Rys. 8. Przykład wykresu Ishikawy

Proces analizy za pomocą wykresów przyczynowo-skutkowych sprowadza się do:

1) zdefiniowania zagadnienia, które może wynikać z uprzedniego użycia histogramu, kart kontrolnych, wykresu Pareto itp.,

2) wyboru metody analizy zespołowej w gronie specjalistów zainteresowanych dziedzin (burza mózgów i różne jej odmiany),

3) naniesienia na wykres linii centralnej i ramki z nazwą analizowanego problemu,

4) wyszczególnienia głównych kategorii przyczyn składających się na występowanie danego problemu (np. człowiek, maszyna, materiał, pomiar),

5) identyfikacji szczegółowych przyczyn w obrębie każdej głównej kategorii,

6) analizy poszczególnych przyczyn w kontekście podjęcia działań doskonalących.

4.1.4. Analiza korelacji i regresji - wykresy współzależności

Podczas analizowania zależności pomiędzy dwoma wielkościami, można spotkać się z następującymi związkami:

1) każdej wartości jednego parametru odpowiada jedna wartość drugiego (zależność funkcyjna),

2) zmiana jednego parametru jest powiązana ze zmianą drugiego, ale zależność ta nie jest funkcyjna, ma natomiast wpływ na skupienie i rozrzut tejże wielkości (zależność korelacyjna),

3) zmiana wartości jednego parametru nie ma żadnego wpływu na drugi parametr.

Uwaga: Stwierdzenie korelacji nie koniecznie oznacza zależności przyczynowo-skutkowej między zmiennymi – np. obie zmienne mogą być zależne od innej trzeciej zmiennej; teoretycznie, jeśli zmienna x jest sterowalna istnieje możliwość sterowania zmienną y.

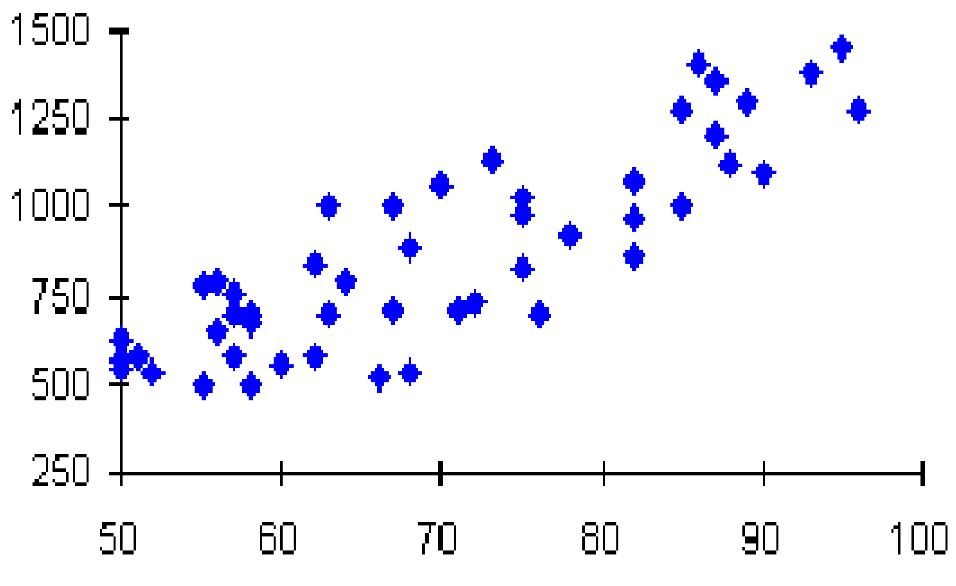
Analiza korelacji pozwala oszacować siłę związku dwóch zmiennych X i Y. Związek ten w przypadku założenia liniowej zależności pomiędzy zmiennymi jest wyrażany przy pomocy **współczynnika korelacji r (Pearsona),** który wyraża się wzorem

$$r = \frac{\Sigma\left(X_i - \overline{X}\right)\left(Y_i - \overline{Y}\right)}{\sqrt{\left(\Sigma\left(X_i - \overline{X}\right)^2\right)\left(\Sigma\left(Y_i - \overline{Y}\right)^2\right)}} \tag{11}$$

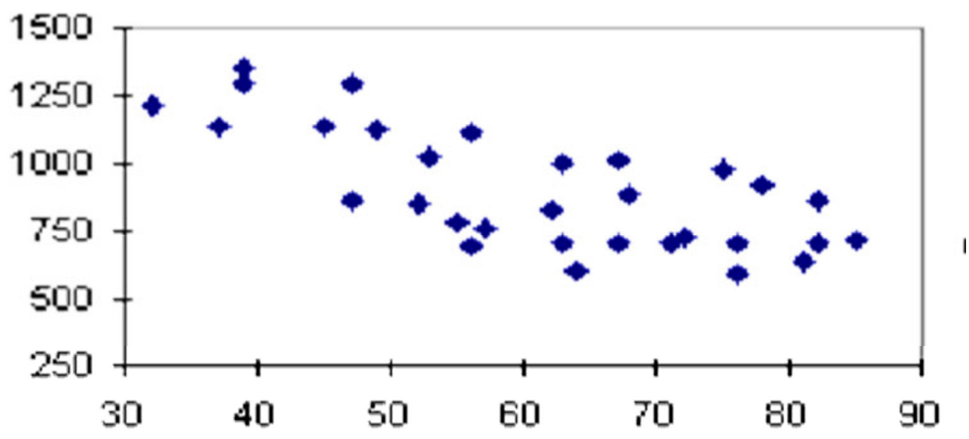
gdzie: X_i, $\overline{X}$ - wartości rozpatrywane i średnia zmiennej niezależnej,

Y_i, $\overline{Y}$ - jw. dla zmiennej zależnej.

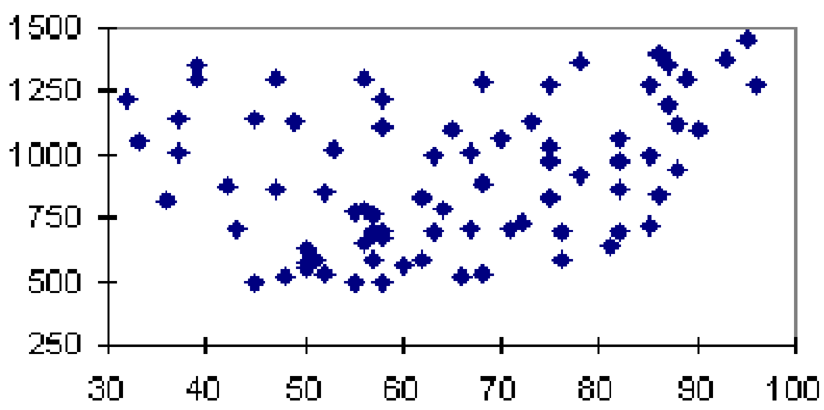
Współczynnik r przyjmuje wartości od -1 do +1. Wartość r = -1/+1 wskazuje, że między zmiennymi istnieje doskonała ujemna (dodatnia) zależność liniowa (gdy X rośnie to Y maleje (rośnie) według funkcji liniowej). Mówi się, że cała "masa prawdopodobieństwa" leży na prostej. Gdy r=0, między zmiennymi nie istnieje liniowa zależność (brak jest współzależności zmiennych). Przykłady diagramów tzw. diagramów rozrzutu przedstawiających współzależność analizowanych zmiennych przedstawione są na rys. 9-11.



Rys. 9. Przykład korelacji dodatniej dwóch zmiennych



Rys. 10. Przykład korelacji ujemnej dwóch zmiennych



Rys. 11. Przykład braku korelacji - zależność wyłącznie przypadkowa

Regresja określa sposób przyporządkowania jednej zmiennej losowej (zmiennej zależnej *Y*) wartościom innej zmiennej (niezależnej *X*), przy pomocy funkcji matematycznej. Może to mieć wielkie znaczenie w przewidywaniu wzajemnego zachowania obu parametrów. Najprostsza, liniowa zależność między *X* i *Y* jest podana następującym wzorem na prostą regresji:

$$Y = a + b(X_i - \overline{X}) \qquad (12)$$

gdzie: $a = \overline{Y} - b(\overline{X})$ - stała,

$b = \dfrac{\Sigma\left(X_i - \overline{X}\right)\left(Y_i - \overline{Y}\right)}{\Sigma\left(X_i - \overline{X}\right)^2}$ - współczynnik nachylenia prostej regresji,

$\overline{X}$, $\overline{Y}$ - wartości średnie *X* i *Y*.

Analiza regresji pozwala na:

- ustalenie istotności związku między wielkościami,

- ustalenie wpływu parametrów procesu na cechy wyrobu,
- ustalenie wpływu cech charakteryzujących jakość typu i wykonania wyrobu na jego parametry użytkowe.

Należy zaznaczyć, że związki pomiędzy analizowanymi zmiennymi mogą mieć oczywiście także charakter nieliniowy – krzywoliniowa funkcja regresji.

4.1.5. Karty kontrolne

Karty kontrolne nazywane też kartami statystycznego sterowania procesem lub kartami Shewharta są uznane, za najistotniejszą technikę wykorzystywaną w ramach SPC. Wynika to z faktu, że częstokroć korzysta się z nich, aby potwierdzić wiarygodność hipotez dotyczących stabilności badanego procesu stawianych na podstawie wykorzystania innych narzędzi, np. w przypadku badania zdolności jakościowej procesu oraz pozyskuje się dane (parametry statystyczne) niezbędne dla dalszych analiz. Przykładowo na podstawie uzyskanych wyników określa się wartość odchylenia standardowego i wartości średniej w badanej populacji.

Najczęściej stosowane karty kontrolne podzielić można na trzy podstawowe rodzaje:

1) Dla cech mierzalnych (liczbowa ocena właściwości) - karty $\bar{x}$-R (średniej i rozstępu), $\bar{x}$-s (średniej i odchylenia standardowego), mediany i rozstępu (*Me*-*R*), wartości indywidualnych *X*.

2) Dla cech ocenianych alternatywnie, do których zaliczają się m.in. karty frakcji jednostek niezgodnych (wadliwości) *p,* liczby jednostek niezgodnych (*np*) - oparte na rozkładzie dwumianowym oraz karty *c* (oparte na rozkładzie Poissona) służące śledzeniu liczby wad (niezgodności) lub karty *u* do monitorowania liczby wad (niezgodności) przypadających na określoną jednostkę (np. m^2 powierzchni, sztukę wyrobu, metr bieżący).

3) Karty sum kumulacyjnych dla cech mierzalnych i niemierzalnych.

Podstawowym dokumentem normatywnym opisującym zasady projektowania oraz wykorzystania kart wymienionych w p. 1 i 2 jest **norma PN-ISO 8258+AC1 „Karty kontrolne Shewharta”**.

Karty kontrolne projektowane są w oparciu o dwie metody:

1) **Metoda stabilizacyjna** opiera się na danych zbieranych z przebiegającego już procesu. Linie kontrolne na torach kart oblicza się na podstawie tzw. badań wstępnych, czyli na podstawie danych zebranych, z pobieranych w określonych odstępach czasu pierwszych

20-30 próbek n-sztukowych. Obliczone wartości linii kontrolnych nanosi się na tor karty. Jeśli wartości odpowiednich parametrów statystycznych w próbkach wstępnych, mieszczą się w ustalonych granicach kontrolnych, można przystąpić do kontroli bieżącej procesu. W przeciwnym razie stwierdza się, że proces nie jest stabilny, a linie kontrolne należy przeliczyć ponownie, z wyłączeniem próbek nie mieszczących się w przyjętym obszarze kontrolnym.

2) **Metoda projektowa** ma zastosowanie, gdy nie jest możliwe uzyskanie danych z procesu (procesy nowoprojektowane) bądź, gdy pragnie się, aby narzucić z góry warunki, jakim ma podlegać proces technologiczny. Podstawą obliczenia granic kontrolnych w tej metodzie, jest tolerancja analizowanej cechy mierzalnej lub wadliwość dla cech alternatywnych. Linie kontrolne wyznacza się w odpowiedniej, wyznaczonej na podstawie wzorów odległości od granic tolerancji.

Najczęściej stosowaną w praktyce przedsiębiorstw jest metoda stabilizacyjna. Opis metody projektowej można znaleźć w większości prac z zakresu statystycznej kontroli (sterowania) jakości procesów.

Poniżej omówione zostaną najważniejsze, z punktu widzenia zastosowań praktycznych, rodzaje kart kontrolnych, projektowanych metodą stabilizacyjną.

4.1.5.1. Karta $\bar{x}$-*R*

W zastosowaniach przemysłowych inżynierii jakości wśród kart cech mierzalnych, najczęściej wykorzystywana jest karta $\bar{x}$-*R*, głównie dzięki prostocie określania potrzebnych parametrów statystycznych.

Obsługujący dane urządzenie, pobiera w określonych odstępach czasu próbki losowe i pomierzone wartości parametru nanosi w postaci wartości średniej $\bar{x}$ oraz rozstępu (odchylenia standardowego) na wykres (diagram). Powinien on obserwować wszelkie nieregularności na karcie. Jeśli takowe stwierdzi, musi ustalić przyczynę i podjąć działania korygujące. Należy pamiętać, że proces uznaje się za opanowany (stabilny statystycznie), gdy zarówno wartości średnich $\bar{x}$ jak i rozrzutu (*R* lub *s*) na to wskazują. Gdy stwierdzi się, że w procesie nie występują inne poza przypadkowymi, przyczyny zmienności, np. nie ma charakterystycznego układu punktów na karcie, można określać zdolność jakościową procesu przy pomocy odpowiednich wskaźników.

Uważa się, że karty kontrolne oddają podział odpowiedzialności za jakość. Karta $\bar{x}$ jest odzwierciedleniem zachowania i umiejętności bezpośredniego operatora urządzenia, jego reakcji na stwierdzone odchylenia w wycentrowaniu (zmiana wartości średniej) procesu.

Karta R rozstępu lub s odchylenia standardowego jest obrazem działań kierownictwa i sprawności organizacji. Ogólny tok postępowania przy projektowaniu i wykorzystaniu kart kontrolnych jest następujący:

1) Przygotowanie

a) Przeprowadzenie analizy celowości stosowania kart.

b) Wybór cechy mierzalnej wyrobu.

c) Ustalenie wielkości próbki i częstotliwości jej pobierania; należy w tym miejscu mieć na względzie następujące czynniki:

- gdy nie wiadomo, czy rozkład badanej cechy jest rozkładem normalnym, liczność próbek musi wynosić co najmniej 4 (wynika to z tzw. centralnego twierdzenia granicznego),
- przy wzroście liczności próbki, linie kontrolne zbliżają się do linii centralnej (współczynniki D_3, D_4, A_2, służące obliczeniu linii kontrolnych są funkcją liczności próbki), co sprawia, że karty stają się bardziej czułe na zmienność nielosową, ale jednocześnie wzrasta koszt badania.

Tablica 2 przedstawia wybrane wartości współczynników D_3, D_4 i A_2 dla najczęściej stosowanych liczności próbek n (por. wzory 13 - 16).

Tablica 2

Współczynniki potrzebne do zaprojektowania karty $\bar{x}$-R

n	A_2	D_3	D_4
2	1.880	0.000	3.267
3	1.023	0.000	2.574
4	0.729	0.000	2.282
5	0.577	0.000	2.115
6	0.483	0.000	2.004
7	0.419	0.076	1.924
8	0.373	0.136	1.864
9	0.337	0.184	1.816
10	0.308	0.223	1.777

- gdy dla celów badania konieczne jest przeprowadzenie prób niszczących, należy stosować możliwie najmniejszą liczność próbki,

d) Zaprojektowanie formularza do zapisu danych.

Tablica 3 przedstawia przykładowy ogólny wygląd formularza karty kontrolnej. W nawiasach podano, kto odpowiada za wypełnienie poszczególnych sekcji.

Tablica 3

Sekcje formularza karty kontrolnej dla karty $\overline{x}$-R

<table>
<tr><td colspan="2">Sekcja informacyjna (kierownictwo i operator)</td></tr>
<tr><td colspan="2">Sekcja identyfikacyjna (operator)</td></tr>
<tr><td>Pomiary i obliczenia (operator)</td><td>Wskazówki interpretacyjne (operator)</td></tr>
<tr><td>Diagramy $\overline{x}$ i R (operator)</td><td>Wykorzystana dokumentacja (operator)</td></tr>
</table>

W **sekcji informacyjnej** podane są zwykle, w odpowiednich komórkach tabeli, następujące informacje:

- identyfikacja (symbol) badanego elementu / części / wyrobu,
- wykorzystywana maszyna/stanowisko,
- typ karty kontrolnej (np. $\overline{x}$-R),
- numer/symbol karty,
- analizowany parametr / cecha (ew. tolerancja podana w dokumentacji projektowej),
- wykorzystywany sprzęt pomiarowy,
- liczność próbki oraz częstotliwość jej pobierania,
- wartości odpowiadające obliczonym liniom kontrolnym (górnej - GLK, centralnej - LC i dolnej - DLK) na torach karty (np. na torach $\overline{x}$ i R).

Sekcja identyfikacyjna (tabl. 4) zawiera informacje określające moment pobrania poszczególnych próbek oraz operatora.

Tablica 4

Przykład sekcji identyfikacyjnej na formularzu karty kontrolnej

Data pobrania próbki										
Godzina pobrania próbki										
Pracownik										

W sekcji tej powinno być przewidziane tyle kolumn ile próbek n - elementowych przedstawia dany arkusz karty (zwykle 25 próbek).

Sekcja pomiarów i obliczeń (tabl. 4.4) wypełniana jest przez operatora i zawiera dane pomiarowe badanej cechy w poszczególnych próbkach oraz obliczone wartości parametrów statystycznych, np. wartości średniej $\overline{x}$ i rozstępu *R*.

Tablica 5

Przykład sekcji, zawierającej wyniki pomiarów próbek (5-elementowych) i obliczeń parametrów statystycznych (dla karty $\overline{x}$-*R*)

Nr próbki									
Pomiary w próbkach	**1**								
	2								
	3								
	4								
	5								
Średnia w próbce $\overline{x}$									
Rozstęp w próbce *R*									

Kolumny w tej sekcji odpowiadają kolumnom ustalonym w sekcji identyfikacyjnej dla poszczególne próbki. W sytuacji, gdy w zaplanowanym harmonogramie pobierania próbek nastąpi przerwa, np. awaria maszyny, kolumnę, w której dane te powinny być naniesione należy zostawić pustą.

2) Zaprojektowanie parametrów (linii kontrolnych) karty (na przykładzie karty $\overline{x}$ - *R*)

a) Dokonywanie pomiarów rozpatrywanej cechy w pierwszych 20-30 próbkach i zapis wyników.

b) Obliczenie parametrów statystycznych dla poszczególnych próbek ($\overline{x}$, *R*).

c) Obliczenie średniego rozstępu $\overline{R}$ i średniej średnich $\overline{\overline{X}}$ dla pobranych próbek.

d) Naniesienie linii centralnych LC, tj. wartości $\overline{\overline{X}}$ dla toru średnich i wartości $\overline{R}$ dla toru rozstępów, a następnie obliczenie linii kontrolnych według wzorów:

- dla toru średnich;

a) górna linia kontrolna,

$$GLK = \overline{\overline{X}} + A_2 \overline{R} \tag{13}$$

b) dolna linia kontrolna

$$DLK = \overline{\overline{X}} - A_2 \overline{R} \tag{14}$$

- dla toru rozstępów;

a) górna linia kontrolna

$$GLK = D_4 \overline{R} \tag{15}$$

b) dolna linia kontrolna:

$$DLK = D_3 \overline{R} \tag{16}$$

Rozkład prawdopodobieństwa rozstępów jest w przeciwieństwie do rozkładu średnich asymetryczny, w związku z tym $D_3 \neq D_4$.

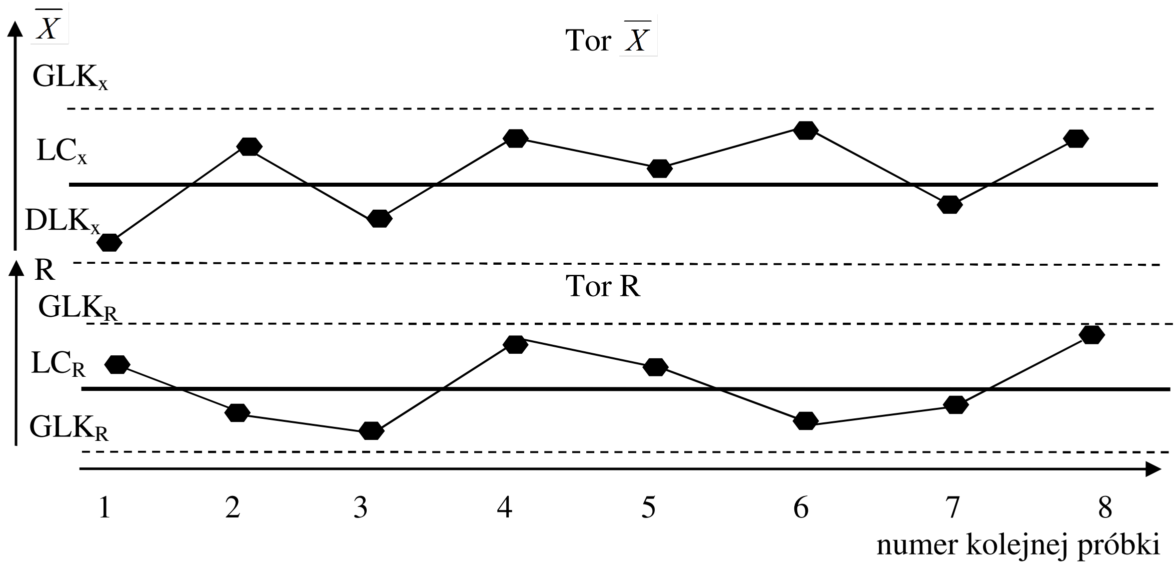
Wartości współczynników A_2, D_3 *i* D_4 podano dla wybranych liczności próbek wcześniej w tabeli 2 a pełną informację na ich temat można znaleźć, np. w normie **PN-ISO 8258+AC1**.

Zalecaną zasadą praktyczną przy projektowaniu toru wartości średnich $\overline{x}$, jest by po wstępnych obliczeniach linii centralnej i kontrolnych (25÷30 próbek), przesunąć je tak, by ich położenie było symetryczne względem pola tolerancji badanego parametru (linia centralna na torze $\overline{x}$ powinna pokrywać się ze środkiem pola tolerancji analizowanego parametru). Wynika to z symetryczności rozkładu normalnego.

Diagram (np. $\overline{x}$-R) sporządzany jest przez operatora. Należy zwracać uwagę na nanoszenie a następnie łączenie odpowiednich punktów na obu torach, oraz by punkty na tych torach miały tę samą rzędną. W sytuacji braku danych o określonej harmonogramem pobierania próbek porze, punkty na obu torach odpowiadające próbkom pobranym bezpośrednio przed jak i po tym fakcie należy połączyć linią przerywaną. Punkty na diagramie należy nanosić natychmiast po ich obliczeniu, gdyż szybka informacja jest sprawą kluczową.

Linie centralne i kontrolne, oblicza się na podstawie pierwszych 25 próbek. Należy podkreślić konieczność regularnego przeliczania linii kontrolnych w miarę gromadzenia nowych danych, np. co miesiąc, co 100 pobranych próbek itp.

Na rys12 przedstawiono przykład diagramu $\overline{x}$-R



Rys. 12 Fragment diagramu $\overline{x}$-R na karcie kontrolnej

Należy podkreślić, że nie jest wskazane umieszczanie granic tolerancji na karcie $\overline{x}$, ponieważ tolerancja dotyczy wartości badanej cechy w poszczególnych jednostkach wyrobu a karta przedstawia wartości średnie tej cechy w próbkach. Średnia wartość w próbce może wypaść w przedziale tolerancji, mimo że kilka egzemplarzy w tej próbce wykazuje wartość cechy przekraczającą granice tolerancji).

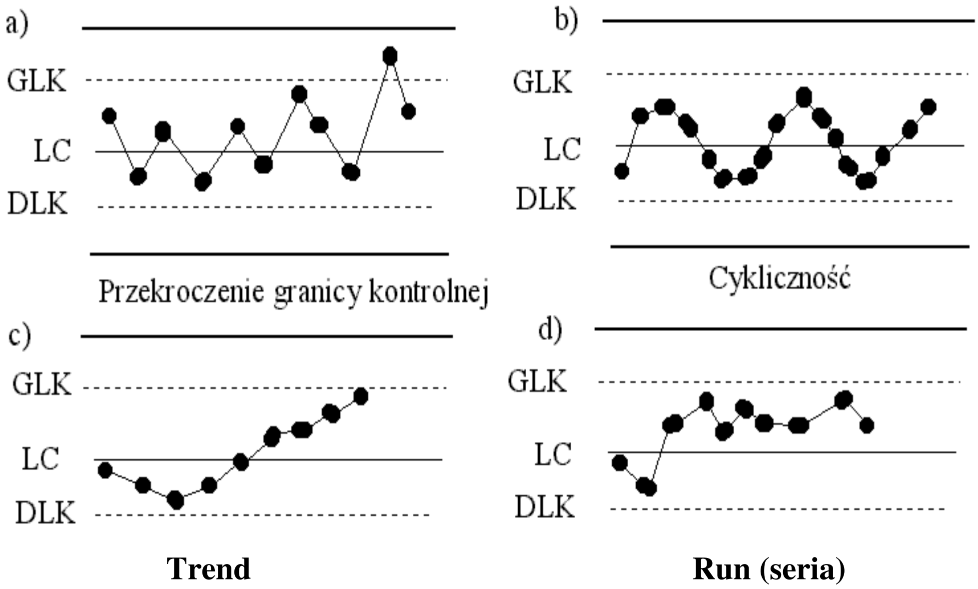
3) Analiza i interpretacja karty

a) Obserwacja punktów na kartach rozstępów i średnich, analiza układów punktów wskazujących na nieprawidłowości w procesie, ocena stabilności procesu.

Stosowanie karty kontrolnej jest ciągłym testem hipotezy statystycznej. Dla karty $\overline{x}$-R są to testy o wartości średniej oraz rozstępie w populacji - czy parametry statystyczne stanowiące o rodzaju karty przyjmują wartość odpowiadającą położeniu linii centralnej na torze, np. $\overline{x}$ i R. W przypadku wykrycia charakterystycznych układów punktów na karcie należy wnioskować, że zmienność w analizowanym procesie nie jest prawdopodobnie wynikiem przyczyn losowych i trzeba ustalić źródło jego niestabilności (przyczynę).

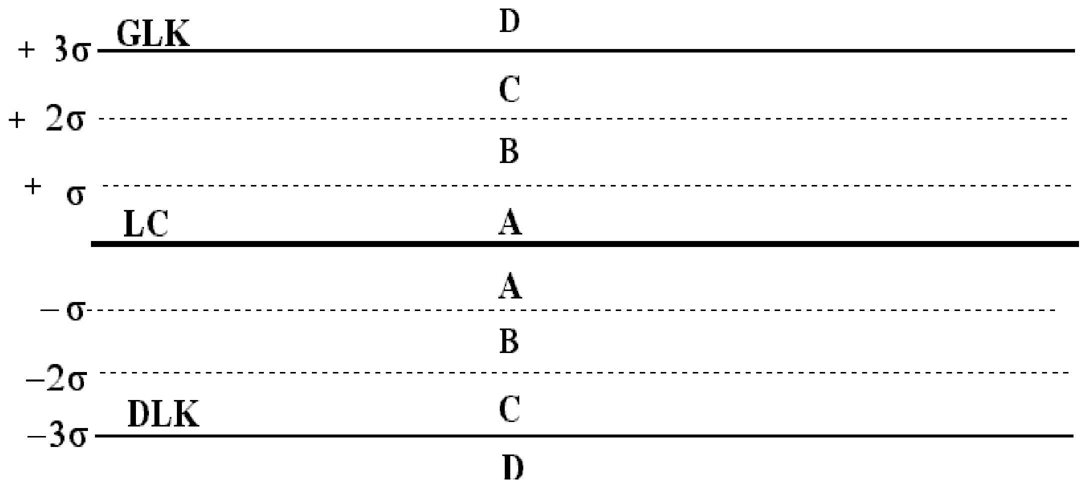
Najważniejsze układy punktów na kartach kontrolnych **świadczące o występowaniu w procesie nielosowych przyczyn zmienności**:

- **sygnał**- punkt poza liniami kontrolnymi (ew. ostrzegawczymi) – rys. 13a,
- **trend** - 7 lub więcej kolejnych punktów, wszystkich w układzie rosnącym lub malejącym – rys. 13 c,
- **run** - 7 lub więcej kolejnych punktów, wszystkich powyżej lub poniżej linii centralnej – rys. 13 d,
- **cykliczność** – rys. 13 b.



Rys. 13. Najczęściej spotykane dowody utraty stabilności procesu wskazywane na kartach kontrolnych

W interpretowaniu układów punktów na kartach $\bar{x}$, pomaga znajomość właściwości rozkładu normalnego oraz podstawowych praw rachunku prawdopodobieństwa. Jeżeli kartę kontrolną podzielimy na trzy obszary, liniami znajdującymi się w odległości $\pm\sigma_X$ □, $\pm2\sigma_X$, i $\pm3\sigma_X$ od linii centralnej (rys. 4.10), to możemy stwierdzić, że w strefie **A** (po obu stronach LC) powinno znaleźć się około (68%) wszystkich punktów występujących na całej karcie. W obu strefach **B** należy oczekiwać po około 13.5% wszystkich punktów (95.5% - 68.3%), w obu strefach **C** po około 2% (99.73-95.5%) wszystkich punktów, natomiast w obu strefach **D** (poza liniami kontrolnymi) prawdopodobieństwo wystąpienia w nich punktów na karcie kontrolnej, wynosi po ok. 0.13%.



Rys. 14. Cztery strefy na torze karty kontrolnej

b) Weryfikacja linii centralnych i kontrolnych.

Jeśli wartości parametrów próbek wykorzystanych do obliczenia linii kontrolnych, mieszczą się w granicach kontrolnych, można wykorzystać zaprojektowane tory karty do bieżącej analizy procesu. W sytuacji wskazującej na występowanie przyczyn nielosowych (sygnały, runy, trendy), konieczne jest wykrycie i wyeliminowanie tych przyczyn oraz ponowne obliczenie linii kontrolnych, bez uwzględnienia próbek o parametrach nie mieszczących się w pierwotnych granicach.

Określenie spodziewanej wadliwości w analizowanym za pomocą takiej karty procesie, jest bardzo proste, bowiem znana jest wartość średnia w procesie (linia centralna $\bar{\bar{x}}$ na torze $\bar{x}$) oraz odchylenie standardowe (obliczone na podstawie średniego rozstępu $\bar{R}$). Wystarczy więc, stosując procedurę podaną przy okazji omawiania rozkładu normalnego, obliczyć odpowiednie powierzchnie (prawdopodobieństwa) pod krzywą normalną, ograniczone przyjętą tolerancją analizowanego parametru.

c) Podjęcie niezbędnych działań korygujących w procesie.

Prawdopodobnymi **przyczynami trendu** mogą być:

na karcie $\bar{x}$; - stopniowe zużywanie się sprzętu (narzędzi),

- zmęczenie operatora,
- nagromadzenie odpadów na stanowisku,
- rosnąca (malejąca) temperatura otoczenia,

na karcie R; - zmiana operatora,

- stopniowa zmiana własności materiału przerabianego w procesie.

Jako główne przyczyny runów (serii) przyjąć można:

na karcie $\overline{x}$; - zmieszanie części przeznaczonych do montażu elementu,
- zmiana operatora lub maszyny,
- zmiana metody pomiarowej,
- zmiana parametrów procesu,

na karcie R; - zmiana materiału,
- zmiana technologii,
- zmiana operatora.

Przyczyny powodujące występowanie **cykliczności** to:

na karcie $\overline{x}$: - cykliczne zmiany warunków otoczenia (np. temperatury),
- zmęczenie operatora,
- regularne zmiany sprzętu, materiałów, operatora,

na karcie R: - okresowe działania obsługi urządzeń,
- zmęczenie operatora,
- zużycie narzędzi (okresowa wymiana).

Należy podkreślić, że stwierdzenie statystycznej stabilności monitorowanego procesu nie oznacza, że wadliwość tego procesu jest odpowiednia. Proces **może się bowiem ustabilizować na nieodpowiednim poziomie**. Konieczne stąd jest, dla próbek wstępnych obliczenie współczynników zdolności jakościowej i w razie potrzeby, podjęcie odpowiednich działań korygujących.

Karty kontrolne dla cech niemierzalnych

Ogólna procedura projektowania kart kontrolnych wadliwości ***p*** lub liczby wad w próbce ***c*** pomimo tego, że dotyczą one innego rodzaju cech, jest analogiczna do podanej dla kart $\overline{x}$-R.

W przypadku karty p konieczne jest obliczenie ułamka

$$p = \frac{x}{n} \tag{17}$$

gdzie: x-liczba sztuk wadliwych w próbce,
n- liczność próbki.

Linie centralną i linie kontrolne - górną i dolną oblicza się wg wzorów:

$$LC = \overline{p} \tag{18}$$

$$GLK = \overline{p} + 3\sqrt{\frac{\overline{p}\left(1-\overline{p}\right)}{n}} \tag{19}$$

$$DLK = \overline{p} - 3\sqrt{\frac{\overline{p}\left(1-\overline{p}\right)}{n}} \tag{20}$$

gdzie $\overline{p}$ - średnia wadliwość obliczona na podstawie odpowiedniej liczby próbek.

Z zależności tych wynika, że wielkość próbki wpływa na położenie linii kontrolnych na karcie *p*. Możliwe jest więc wykorzystywanie próbek o różnych licznościach. Próbkę może stanowić np. dzienna lub tygodniowa produkcja danego wyrobu. Należy pamiętać jednak o konieczności przeliczania linii kontrolnych. Praktycznie, gdy różnice liczności próbek nie różnią się więcej niż o ± 25% od średniej liczności próbki, można zamiast *n* przyjąć w powyższych wzorach wartość średniej liczności.

Odmianą karty *p* jest **karta liczby sztuk wadliwych w próbce o stałej liczności** *np*. Zaletą tej karty jest fakt, że nie trzeba dokonywać żadnych obliczeń w próbce, wystarczy policzyć liczbę sztuk wadliwych.

Dla **karty *c* przedstawiającej liczbę wad w określonej próbce,** np. liczba pęcherzy powietrznych w wyrobie szklanym, liczba błędów w fakturze, liczba wad powierzchni w arkuszu blachy, obowiązującym rozkładem prawdopodobieństwa jest rozkład Poissona. W przeciwieństwie do kart wadliwości przyjmujących za podstawę rozkład dwumianowy Bernouliego, nie jest możliwe (a wręcz absurdalne) określenie liczby wad w wyrobie, których nie ma. Rozkład dwumianowy zakłada, że można określić liczbę wyrobów wadliwych i nie mających wad.

Parametry karty *c* oblicza się według poniższych wzorów:

$$LC = \overline{c} \tag{21}$$

$$GLK = \overline{c} + 3\sqrt{\overline{c}} \tag{22}$$

$$DLK = \overline{c} - 3\sqrt{\overline{c}} \tag{23}$$

gdzie: $\overline{c}$ - średnia liczba wad w próbce (jednostce wyrobów) w analizowanym procesie.

Wielkość próbki powinna być dobrana zgodnie z warunkami podanymi dla karty *p*.

Karta *c* wymaga by pobierana próbka miała taką samą wielkość (tj.1 wyrób, 5 m^2 materiału, 1 metr bieżący tkaniny itp.). Bywają jednak przypadki, gdy łatwiejsze praktycznie jest badanie danej próbki wyrobu, aż do znalezienia w niej wady, niż określanie liczby wad w stałej próbce. Karta oznaczana symbolem *u*, daje możliwość stosowania analizy statystycznej cech niemierzalnych (np. frakcji wad) przypadających na jednostkę wyrobu, czasu lub jednostkę miary (długość, objętość, powierzchnia).

Podobnie jak w przypadku kart dla liczby (frakcji) sztuk wadliwych, linie kontrolne kart c i u są tak usytuowane, że prawdopodobieństwo ich przekroczenia wynosi 0.5%.

Często spotykaną praktyką, jest wykorzystywanie kart c lub u do oceny procesu, w wyniku którego powstaje wyrób o wielu cechach mierzalnych, istotnych z punktu widzenia jakości tego wyrobu. W takiej sytuacji spotykanej prowadzenie kart kontrolnych typu $\bar{x}$-R lub $\bar{x}$-s, dla każdej z tych cech byłoby niezwykle kosztowne.

Do tak postawionego problemu można podejść dwojako, albo zdecydować się na 1-2 cechy najistotniejsze i stosować karty $\bar{x}$-R, a gdy to nie jest merytorycznie uzasadnione, można potraktować każdą z cech mierzalnych (np. wymiarów) **jako potencjalną wadę** i dokonywać ich oceny alternatywnej np. przy pomocy sprawdzianów, stosując karty z lub u. Próbkę może stanowić jeden wyrób lub określona jego partia. Informacje uzyskane w ten sposób, choć nie tak konkretne jak w przypadku kart cech mierzalnych, mają duże znaczenie, z punktu widzenia oceny stabilności procesu oraz mogą być wykorzystane do zainicjowania już skonkretyzowanych działań korygujących.

Powszechną, praktyką jest pomijanie na kartach kontrolnych cech niemierzalnych, dolnych linii kontrolnych. Dzieje się tak z dwóch powodów:

- ważniejsze, z praktycznego punktu widzenia, jest stwierdzenie zwiększenia średniej wadliwości (liczby wad) w procesie, niż jej zmniejszenia (zjawisko pozytywne),
- często zdarza się, że dolna linia kontrolna przyjmuje wartość ujemną, co jest oczywistą sprzecznością.

Trzeba jednak zauważyć, że dolna linia kontrolna może posłużyć jako dowód potwierdzający udoskonalenie badanego procesu, np. zmniejszenie średniej wadliwości lub liczby wad, co w innej sytuacji mogłoby ujść uwadze.

Występowanie runów i trendów na kartach cech mierzalnych jest, podobnie jak w przypadku cech mierzalnych, dowodem występowania przyczyn wyznaczalnych. Przyjmuje się identyczne, jak opisane dla kart $\bar{x}$-R, układy i liczbę punktów świadczących o utracie stabilności statystycznej.

Na zakończenie omawiania kart kontrolnych dla cech niemierzalnych, warto podkreślić istotę ich interpretacji. Załóżmy, że w wyniku obliczeń otrzymano następujące parametry karty liczby sztuk wadliwych dla wyrobów pochodzących z pewnego procesu:

LC=3.2; *DLK*= 0.7; *GL*K= 5.7. Oznacza to, że w badanych próbkach o stałej liczności, należy spodziewać się w analizowanym procesie przeciętnie 3 sztuk wadliwych. Proces należy traktować za stabilny, kiedy w badanych próbkach wystąpi 1, 2, 3, 4 i 5 wadliwych sztuk (te liczby braków należy przypisywać zmienności przypadkowej). Stwierdzenie 6 sztuk wadliwych nakazuje już podjęcie działań regulacyjnych w procesie, trzeba jednak pamiętać, że istnieje około 1 szansa na 200, iż działania te mogą być podjęte zbyt pochopnie. Stwierdzenie, że w badanej próbce nie ma żadnej sztuki wadliwej, jest sygnałem, że wystąpiło zmniejszenie średniej wadliwości w procesie. Analizując stan procesu, można wówczas określić optymalne, zapewniające poprawę jakości, wartości poszczególnych jego parametrów.

Należy podkreślić, że w sytuacji, gdy proces jest stabilny, ale charakteryzuje się dużą zmiennością losową (tzn. niską zdolnością jakościową), karty kontrolne nie dostarczają wartościowych informacji umożliwiających redukcję tej zmienności. Narzędziem, które daje możliwość tej redukcji jest zaplanowany eksperyment. Stąd też SPC i planowanie eksperymentów to metodyki, które wzajemnie się uzupełniają, jeśli chodzi o zapewnienie i doskonalenie jakości produkcji bądź realizacji usług.

Zdolność (zdatność) jakościowa procesów

Wprowadzenie sytemu zarządzania jakością nakłada m.in. na firmę, obowiązek określania i analizy stanu przydatności wykorzystywanych urządzeń technologicznych i prowadzonych procesów do wytworzenia wyrobów lub realizacji usług o zadowalającym odbiorców poziomie jakości.

Analiza zdolności jakościowej procesu (w wielu publikacjach dotyczących problematyki statystycznego sterowania procesami używa się również pojęcia „zdatność”) polega na skojarzeniu rozkładu charakteryzującego rozrzut wyników procesu z tolerancją ustaloną dla parametru wyrobu/usługi uzyskiwanego w tym procesie.

Znając parametry statystyczne opisujące rezultaty danego procesu, tzn. odchylenie standardowe σ i wartość średnią μ, można dla danej tolerancji określić spodziewaną wadliwość procesu.

W praktyce przemysłowej wartości: średnia badanego parametru i środek pola tolerancji są względem siebie przesunięte. Powiększa to wadliwość procesu. Jeśli jednak rozrzut badanego parametru w procesie jest, w stosunku do wartości tolerancji, odpowiednio mały, to pomimo przesunięcia wartości oczekiwanej względem środka pola tolerancji wyniki takiego procesu będą mieściły się w granicach tolerancji i założona wadliwość nie zostanie przekroczona.

Podstawowymi miernikami zdolności jakościowej procesu lub maszyny są wskaźniki potencjalnej i rzeczywistej zdolności jakościowej.

1) **Wskaźnik zdolności potencjalnej procesu C_p** (spotyka się również oznaczenie ***PCI*** *–ang. process capability index*), który oblicza się według wzoru:

$$C_p = \frac{T}{6\sigma} \tag{24}$$

gdzie: T – wielkość tolerancji dla analizowanego parametru,

σ - odchylenie standardowe badanego parametru w populacji.

Wskaźnik ten nie uwzględnia przesunięć wartości średniej względem środka pola tolerancji, pokazując pośrednio, jakiego procentu braków można oczekiwać przy idealnym wyśrodkowaniu procesu (maszyny), tzn. gdy wartość średnia analizowanego parametru pokrywa się z jego środkiem pola tolerancji.

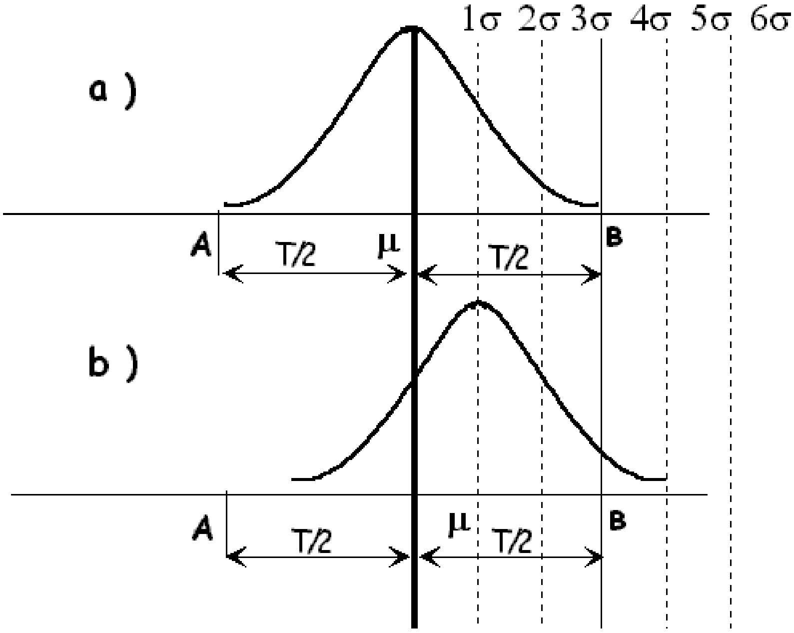
2) **Wskaźnik rzeczywistej zdolności C_{pk}** procesu:

$$C_{pk} = min.\left(\frac{\mu - A}{3\sigma}; \frac{B - \mu}{3\sigma} \right) \tag{25}$$

gdzie: A, B - dolna i górna granica tolerancji rozpatrywanego parametru,

μ, σ - wartość średnia i odchylenie standardowe parametru.

Wskaźnik C_{pk} uwzględnia więc także błędy "wyśrodkowania" procesu (maszyny). Mając obliczone wskaźniki C_p i C_{pk} dla tego samego procesu możemy stwierdzić, czy jest on prawidłowo (oba wskaźniki przyjmują tę samą wartość) czy nieprawidłowo wyśrodkowany ($C_{pk}<C_p$). Oczywiście wartość współczynnika C_{pk} nigdy nie przekroczy wartości współczynnika C_p dla tego samego procesu. Na rysunku 15 przedstawiono rozkłady prawdopodobieństwa odpowiadające dwóm procesom. W przypadku procesu a) oba wskaźniki zdolności jakościowej mają jednakową wartość, ponieważ średnia tego procesu μ pokrywa się ze środkiem jego pola tolerancji. Dla procesu b)**,** którego średnia przesunięta jest, w stosunku do środka tolerancji, o wartość jednego odchylenia standardowego, wskaźnik C_{pk} ma mniejszą wartość równą 0.67, przy tej samej wartości C_p (oba procesy mają jednakowy rozrzut).



$C_p=C_{pk}=1$

$C_p=1;\ C_{pk}=0.67$

Rys.15. Wyjaśnienie znaczenia wskaźników zdolności jakościowej C_p oraz C_{pk}

Oba podane wzory na współczynniki zdolności jakościowej dotyczą parametrów o rozkładzie normalnym, procesów, w których nie występują systematyczne przyczyny zmienności. W praktyce najczęściej zakłada się z góry, że rozkład badanej cechy jest normalny nie przewidując ewentualnych konsekwencji takiego założenia. Niezgodność rozkładu rzeczywistego badanego parametru z rozkładem normalnym powoduje, że obliczone wskaźniki zdolności jakościowej nie odpowiadają rzeczywistości. Jednym ze sposobów rozwiązania tego problemu jest przeanalizowanie przyczyn zmieniających charakter rozkładu danej cechy. Jak to już podano przy okazji omawiania rozkładu Gauss'a, występuje on wówczas, gdy na wartość danej zmiennej losowej wpływa szereg drobnych losowych (przypadkowych) przyczyn zmienności. Kiedy natomiast na wartość zmiennej losowej wpływa dodatkowo jedna lub więcej istotnych przyczyn systematycznych, np. zużycie narzędzia, wzrost temperatury otoczenia itp., rozkład zmienia swój charakter. Trzeba wyeliminować przypuszczalne przyczyny zmienności, ponownie przeprowadzić test normalności rozkładu i w sytuacji, gdy jest on pozytywny, obliczyć wskaźniki zdolności jakościowej. Powszechną więc praktyką jest prowadzenie analizy zdolności jakościowej procesów równocześnie z analizą procesu przy pomocy kart kontrolnych cech mierzalnych.

Badanie zdolności jakościowej powinno być poprzedzone gruntowną analizą czynników warunkujących zmienność w danym procesie. Sposób postępowania przy określaniu zdolności jakościowej procesu jest następujący:

1) Z bieżącej produkcji pobrać próbkę o liczności ok.100 szt. i zmierzyć wartość analizowanej cechy w poszczególnych sztukach próbki, przy użyciu odpowiednio

dokładnych przyrządów pomiarowych. W przypadku monitorowania badanej cech przy pomocy kart kontrolnych np. typu $\bar{x}$-R próbkę może stanowić 20-25 próbek 5-, 6-sztukowych pobieranych zgodnie z zaleceniami w prowadzeniu karty.

2) Obliczenie wartości średniej i odchylenia standardowego danej cechy w próbce.

3) Obliczenie wartości współczynników zdolności procesu C_p i C_{pk}.

W praktyce możliwe są następujące sytuacje charakteryzujące procesy:

1) Proces jest nieustabilizowany statystycznie (pod względem średniej lub rozrzutu) i niezdolny jakościowo (rysunek 16 - procesy 1,2 i 3). Konieczne jest dokonanie "przełomu" w procesie (zmniejszenie rozrzutu spowodowanego przyczynami losowymi) oraz wyeliminowanie przyczyn losowych. Niezbędne w odniesieniu do cech krytycznych może okazać się przejście na kontrolę pełną.
2) Proces jest nieustabilizowany statystycznie, ale zdolny jakościowo. Brak stabilności statystycznej sprawia, że szacowanie zdolności jakościowej jest bezcelowe. Należy wyeliminować istniejące nielosowe (istotne) losowe przyczyny zmienności. Konieczna może okazać się kontrola pełna.
3) Proces jest ustabilizowany statystycznie, ale ma nieodpowiednią zdolność jakościową. Konieczne jest zmniejszenie rozrzutu spowodowane przyczynami przypadkowymi (dokonanie "przełomu" w procesie).
4) Proces jest stabilny statystycznie i zdolny jakościowo (rysunek 16 - procesy 4,5 i 6).

G. Taguchi, zaproponował uniwersalny wskaźnik C_{pm} wg wzoru:

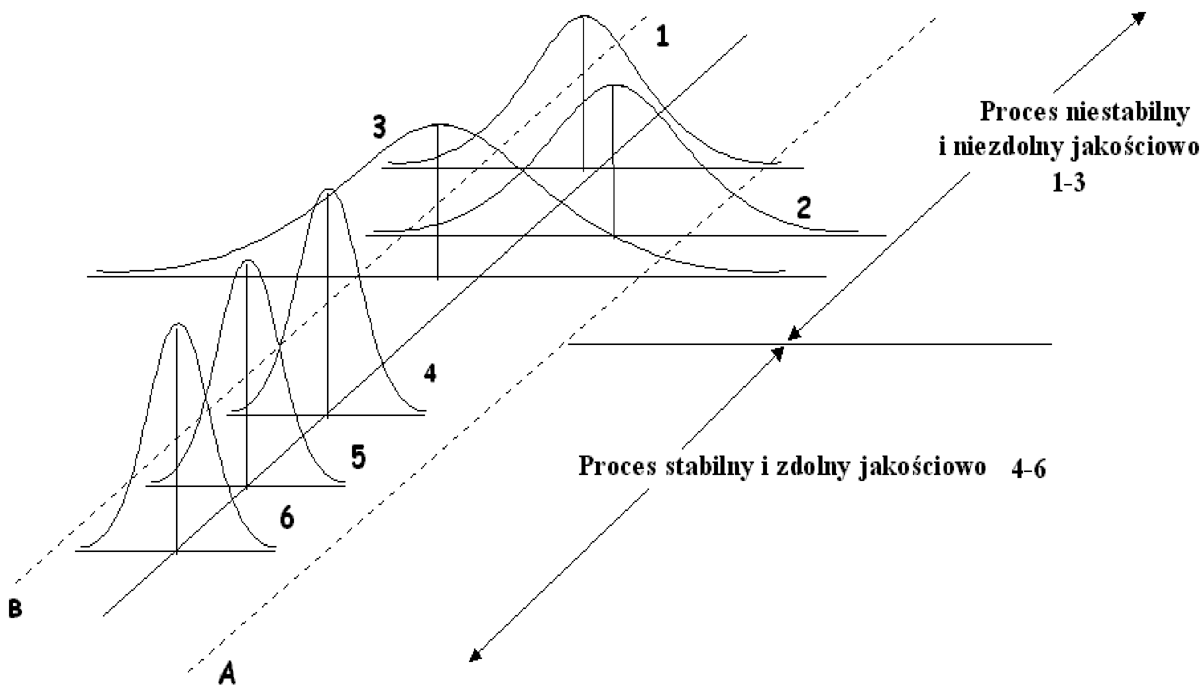
$$C_{pm} = \frac{B-A}{6\tau} \tag{26}$$

gdzie:

$$\tau^2 = \sigma^2 + (\mu - M)^2 \tag{27}$$

M - wartość pożądana parametru (dla rozkładu normalnego powinno być $M = \frac{A+B}{2}$).

Wskaźnik ten, choć reaguje na zmiany w procesie w podobny sposób jak C_{pk}, to w przypadku szacowania parametrów przy pomocy próbek, daje bardziej wiarygodne wyniki.



Rys. 16. Stabilność a zdolność jakościowa procesów

Z zasady im większa jest wartość wskaźników zdolności jakościowej procesu, tym niższa jest spodziewana w tym procesie wadliwość. W tablicy 6 podano wybrane wartości wskaźnika C_p i odpowiadające im - wadliwość w % oraz wskaźnik *ppm* (parts per milion) - części (wadliwych) na milion sztuk, **przy założeniu, że wartość średnia w procesie pokrywa się ze środkiem przedziału tolerancji** - tj. $\mu = \frac{A+B}{2}$

Tablica 6.

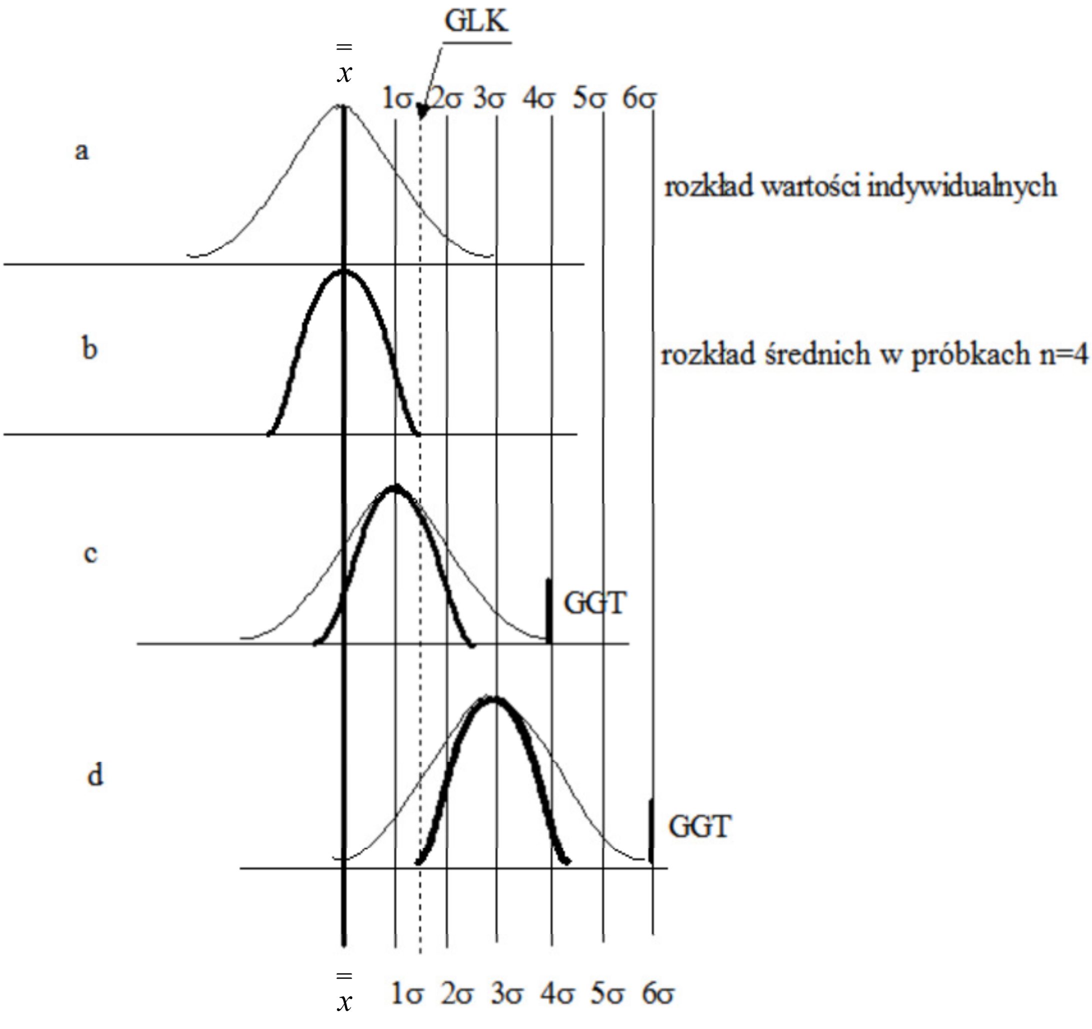
Współczynniki zdolności jakościowej i odpowiadające im wartości wskaźników wadliwości i ppm

C_p	Wadliwość (%)	PPM
0.78	1	10 000
1.03	0.1	1000
1.24	0.01	100
1.33	0.003	32
1.42	0.001	10
1.58	0.0001	1

Rosnące wymagania stawiane dokładności procesów powodują, że proces uważany jest za zdatny jakościowo, gdy wskaźnik $C_{pk} \geq 1,33$, co odpowiada wymaganiu, by rozrzut w procesie był tak niewielki, że tolerancja $T \geq 8\sigma$ (przy idealnym wycentrowaniu).

Istnieje ścisła zależność pomiędzy, czułością karty kontrolnej $\bar{x}$ a zdolnością jakościową badanego procesu. Można to wytłumaczyć posługując się przykładem pokazanym na rys. 17.

Rozkładowi wartości indywidualnych pewnej cechy mierzalnej w badanej zbiorowości, o wartości średniej $\bar{\bar{x}}$ i odchyleniu standardowym (rys. 17 a), odpowiada rozkład wartości średnich w próbkach o liczności 4 sztuk (rys. 17 b), którego odchylenie standardowe $\sigma_{\bar{x}}$, wynosi 0.5σ. Ponieważ $GLK=\bar{\bar{x}}+3\sigma_{\bar{x}}$, więc dla próbek 4-sztukowych znajdzie się ona w odległości $+1.5\sigma$ od linii centralnej.



Rys. 17. Czułość karty kontrolnej $\bar{x}$ a zdolność jakościowa procesu

Jeżeli założymy, że górna granica tolerancji (*GGT*), znajduje się w odległości $+4\sigma$ od $\bar{\bar{x}}$, to współczynnik C_{pk} dla idealnie wycentrowanego procesu, wynosi:

$$C_{pk}= \frac{GGT-\bar{x}}{3\sigma}=\frac{4\sigma}{3\sigma}=1,33$$

Założywszy, że nastąpiła zmiana wartości średniej w procesie o $+1\sigma$ stosunku do $\bar{\bar{x}}$ (rys.4.17 c), można określić prawdopodobieństwo przekroczenia *GLK* na karcie $\bar{x}$ przez proces o podanym współczynnik C_{pk} jako zakreskowane pole. Prawdopodobieństwo to wynosi tylko około 16%, więc, innymi słowy, wykrycie zmiany wartości średniej o $+1\sigma$, za pomocą karty $\bar{x}$ próbek o liczności 4 sztuk, w procesie o współczynniku C_{pk}=1.33, może, średnio rzecz biorąc, nastąpić dopiero po pobraniu 6.3 próbek i naniesieniu odpowiadających im punktów na karcie. Pomimo więc stosunkowo wysokiego wskaźnika zdolności procesu, karta $\bar{x}$ dla próbek n=4 jest mało czuła na zmiany średniej w procesie.

Zupełnie inaczej przedstawia się sytuacja na rys. 4.17 d. Tu wskaźnik C_{pk} wynosi:

$$C_{pk}= \frac{6\sigma}{3\sigma}=2$$

Tutaj zmiana średniej zostanie wychwycona niemal natychmiast tj. z prawdopodobieństwem 99.73%. Tak więc dopiero zestawienie - liczność próbki n=4 i C_{pk}=2 - gwarantuje odpowiednią czułość karty $\bar{x}$. Oczywiście wraz ze wzrostem liczności próbek maleją "wymagania" co do koniecznej zdolności jakościowej procesu, by osiągnąć żądaną czułość karty $\bar{x}$. Z ekonomicznego punktu widzenia wiadomo jednak, że liczność próbek nie może być zbyt duża. Istnieje możliwość określenia granicznych wartości C_{pk} dla różnych liczności próbek:

$$(C_{pk})_{\mathrm{gr}}= \frac{2}{\sqrt{n}}+1 \qquad (28)$$

Korzystając z tego wzoru można wykazać, że z jednakowym prawdopodobieństwem (bliskim jedności) zostanie wykryta zmiana średniej w procesie o współczynniku C_{pk}=2, z którego pobierane są próbki o liczności n=4 jak i w procesie o C_{pk}= 1.67 i n=9.

Istotnym zagadnieniem jest również zależność pomiędzy współczynnikami zdolności jakościowej a częstością pobierania próbek w prowadzeniu kart kontrolnych. Im wyższe współczynniki zdolności jakościowej C_p i C_{pk} tym odstępy czasu pomiędzy kolejnymi próbkami mogą być większe. W tablicy 7 zestawiono dane sugerowane w przemyśle maszynowym [9].

Tablica 7.

Sugerowane odstępy czasowe przy pobieraniu próbek

C_{pk}	**Odstęp czasu pomiędzy kolejnymi próbkami w [godz.]**
0.9-1.0	0,5
1.0-1.1	0,75
1.1-1.2	1
1.2-1.3	1,5
1.3-1.4	2

Wskaźniki zdolności jakościowej stały się w ostatnich latach istotnym parametrem zarządzania jakością. Dotyczy to zarówno ich wykorzystania w przedsiębiorstwie do diagnozowania poszczególnych faz procesu technologicznego, jak również w relacjach klient - dostawca.

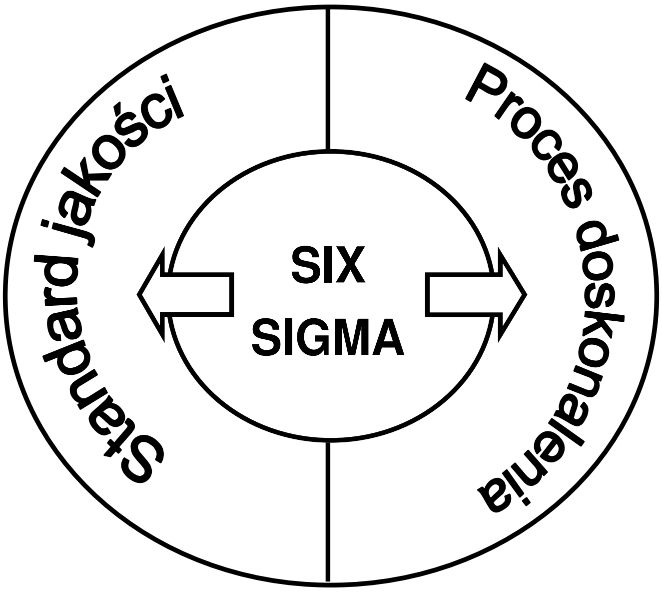
jakościowych wynoszą nawet ok. 15% kosztów wytworzenia [15, 23, 24].

Elementy koncepcji Six Sigma

Six Sigma jest ważną koncepcją należącą do nurtu akcentującego rangę procesów w zarządzaniu organizacjami. Jest to nazwa opracowanej w firmie Motorola, w drugiej połowie lat 80 XX wieku metodyki, której głównym celem jest redukcja zmienności w procesach, prowadząca do poprawy jakości ich wyników, a przez to do zwiększenia zadowolenia klientów. *Six Sigma* określa światowy standard zmienności charakteryzującej proces, wyrażonej odchyleniem standardowym σ (sigma), oznaczający, że w procesie można oczekiwać nie więcej niż 3.4 wad lub błędów na milion możliwości ich wystąpienia. Podejście to skoncentrowane jest na charakterystykach procesów, które są najistotniejsze z punktu widzenia potrzeb klientów. *Six Sigma* stanowi ramy dla realizacji strategii doskonalenia, dostarczając metod, technik i narzędzi wspierających proces zmian w organizacji.

Six Sigma, z jednej strony, jest więc synonimem najwyższego światowego standardu jakości, odnoszącego się do cech wyrobów lub usług oraz parametrów działań w wyniku, których otrzymywane są te wyroby czy usługi. Z drugiej zaś, jest to wieloetapowy, cykliczny proces ukierunkowany na usprawnienia umożliwiające osiągnięcie wspomnianego, bliskiego perfekcji standardu .

Dwa wspomniane aspekty koncepcji *Six Sigma* przedstawia rysunek 18.



Rys. 18. Dwa zasadnicze aspekty koncepcji *Six Sigma* (Źródło: opracowanie własne)

Jako główny mechanizm systemu zarządzania opartego na koncepcji *Six Sigma* uznać doskonalenie procesów ujęte w cyklu DMAIC (ang. *Define, Measure, Analyse, Improve, Control*), który stanowi odmianę klasycznego cyklu ciągłego doskonalenia - fundamentu TQM. W ramach cyklu DMAIC wykorzystywane są różnego rodzaju metody i techniki wspierające poszczególne jego fazy. Należą do nich zarówno proste metody zbierania i prezentacji danych (np. arkusze danych, wykresy przyczynowo - skutkowe czy też wykresy Pareto), jak i zaawansowane metody statystyczne (np. analiza wariancji, planowanie eksperymentów, analiza korelacji i regresji).

Analizując sektor MŚP pod kątem adaptacji strategii *Six Sigma*, należy wziąć pod uwagę, czy rozpatrywane procesy kluczowe dla danej firmy są procesami już istniejącymi, czy procesami projektowanymi. Ma to wpływ na poszczególne etapy działania algorytmu określanego jako DMAIC. Ogólny schemat cyklu DMAIC w strategii *Six Sigma* uwzględniający powyższe rozróżnienie w realizacji działań ilustruje rysunek 19.

Jako charakterystyczne cechy *Six Sigma* wskazać można przede wszystkim:

– skuteczne połączenie czynnika społecznego (np. zmiana kultury organizacyjnej, szkolenia, podnoszenie kompetencji, zaangażowanie, koncentracja na potrzebach klientów wewnętrznych i zewnętrznych) i technik zarządzania procesami (np. statystyczne sterowanie procesami czy też zdolność jakościowa) oraz wykorzystanie ich synergii,

Definiuj

Definiowanie celu ulepszenia Określenie kluczowych klientów i ich wymagań

- Identyfikacja kluczowych procesów
- Opracowanie szczegółowej mapy procesów
- Określanie celów i ograniczeń procesu

⇓

Mierz

Aktualny stan procesu Ocena potrzeb klienta lub rynku

- zdefiniowanie procesu
- zbieranie informacji o aktualnym stanie badanego procesu
- wizualizacja problemu
- przyjęcie celów do realizacji
- opracowanie metod pomiaru
- przeprowadzenie pomiarów

⇓

Analizuj

Wskazanie przyczyn krytycznych powstawania wad Rozwiązania wariantowe procesu

- analiza i ocena otrzymanych wyników
- identyfikacja przyczyn występowania odchyleń
- ustalenie przyczyn zmienności
- określenie zdolności jakościowej badanego procesu

⇓

Doskonal

Wprowadzania rozwiązań Projektowanie rozwiązań

- Proponowanie/Projektowanie rozwiązań problemu
- weryfikacja rozwiązań
- wybór rozwiązań problemu
- wdrażanie rozwiązań

⇓

Kontroluj

Sprawdzenie i monitorowanie Przeprowadzenie testów projektu (procesu)

- Opracowanie planu nadzorowania procesu
- określenie zakresu zadań i odpowiedzialności
- bieżący nadzór
- wdrażanie programu ciągłej oceny procesu

Rys. 19 Cykl DMAIC w strategii *Six Sigma* (opracowanie własne)

– przypisanie w klarowny sposób do poszczególnych faz procesu doskonalenia (cykl DMAIC) zestawu sekwencyjnie stosowanych metod, technik i narzędzi wspierających odpowiednie działania,
– uzależnienie akceptacji dla realizacji inicjatyw doskonalących procesy od wykazania wymiernych oszczędności uzyskanych z tego tytułu; *Six Sigma* koncentruje się na potrzebach klientów przy równoczesnym uwzględnieniu kryterium opłacalności realizowanych procesów.

Chociaż elementy koncepcji *Six Sigma* są z powodzeniem wdrażane w dużych organizacjach zarówno produkcyjnych, jak i usługowych, brakuje ciągle popartych solidnym materiałem empirycznym publikacji prezentujących takie doświadczenia w sektorze MŚP. Rosnące zainteresowanie mniejszych organizacji metodyką *Six Sigma* jest oczywiste zważywszy na fakt, że są one w warunkach zglobalizowanej gospodarki naturalnym dostawcą wyrobów i usług dla dużych korporacji. Te ostatnie zaś w wyniku stale rosnących oczekiwań swoich klientów odnośnie do jakości proponują współpracę tym poddostawcom, którzy mogą te oczekiwania skutecznie pomóc spełniać.

Z uwagi na fakt, że poziom zmienności w procesach spotykanych w MŚP oscyluje w granicach 2÷3 sigma, rezultaty działań doskonalących są tu bardzo szybko widoczne, co stanowi najważniejszy dla kierownictwa czynnik motywujący, potwierdzający słuszność podjętych decyzji. Chociaż więc nie należy zapominać o koniecznych inwestycjach w strukturę *Six Sigma*, można z dużym prawdopodobieństwem przyjąć, że nakłady te zwrócą się w MŚP szybciej niż w dużych przedsiębiorstwach, w których kluczowe procesy są zwykle bardziej oprzyrządowane i przewidywalne.

Czynniki decydujące o sukcesie *Six Sigma* w MŚP uwypuklają jednocześnie następujące specyficzne uwarunkowania, które warto wziąć pod uwagę w trakcie wdrażania tego podejścia w MŚP:

1) Każdy projekt doskonalący określone działanie powinien przynieść korzyść dla przedsiębiorstwa w postaci poprawy wskaźnika zysku. Przedstawiciele MŚP oczekują szybkiej amortyzacji inwestycji w doskonalenie procesów. By zapewnić samofinansowanie projektów *Six Sigma*, czas zwrotu zainwestowanych środków nie powinien przekraczać typowego okresu budżetowania.
2) MŚP nie wykazują podobnej do dużych firm determinacji w długotrwałym monitorowaniu efektywności projektów *Six Sigma*. Zalecane jest więc takie planowanie tych działań, by zapewnić wystarczająco dużo czasu na wykazanie korzyści, przy możliwie jak najkrótszym okresie monitoringu finansowego. Wg cytowanych autorów projekty doskonalące w MŚP nie powinny w związku z tym być planowane na dłużej niż 12 miesięcy.
3) W pierwszym okresie wprowadzania *Six Sigma* w MŚP należy koncentrować się na projektach skoordynowanych z celami wynikającymi z przyjętej przez przedsiębiorstwo strategii.
4) Program szkoleniowy dotyczący *Six Sigma* powinien obejmować zapoznanie z najważniejszymi metodami i narzędziami służącymi identyfikacji, analizie i

rozwiązywaniu problemów, które mogą być stosunkowo szybko opanowane przez wytypowanych pracowników. Ponad 70 % badanych małych firm nie dysponowałoby wystarczającymi funduszami, by takie szkolenia sfinansować.

5) Ponad 90% badanych MŚP stwierdziło, że brakuje im znajomości metod usprawniających doskonalenie procesów. Z uwagi na fakt, że problemy wymagające rozwiązania w celu udoskonalenia działań w MŚP nie są tak złożone, jak w dużych przedsiębiorstwach, to tworzenie w nich równie szerokiej jak w dużych przedsiębiorstwach bazy pracowników, którzy opanowali poziom „zielonego pasa" nie jest konieczne.

6) Podstawowe elementy podejścia procesowego powinny już praktycznie funkcjonować w przedsiębiorstwie wprowadzającym metodykę *Six Sigma*. Cytowane badania sugerują jednak, że pomimo wdrożenia koncepcji bazujących na podejściu procesowym, np. SZJ wg normy ISO 9001, ponad ¾ respondentów uznało, że praktyki podejścia procesowego nie są w nich w odpowiednim stopniu wdrożone. By poprawić tę sytuację proponuje się stosowanie w MŚP uproszczonych, w stosunku do dużych firm, zasad identyfikacji i hierarchizacji procesów oraz budowanie dokumentacji systemowej w pełnej koordynacji z taką uproszczoną strukturą procesów.

7) Programy *Six Sigma* w MŚP, z uwagi na tendencje światowe, powinny być skoordynowane z wymaganiami normy ISO 9001, tak by umożliwić zainteresowanym przedsiębiorstwom certyfikację a następnie utrzymanie tych systemów. Rygor metodyczny *Six Sigma* narzuca spełnianie większości wymagań stawianych przez tę normę, dostarczając jednocześnie niewskazywanych przez nią konkretnych narzędzi służących skutecznemu rozwiązywaniu różnych problemów. Głównym obszarem, na który należy zwrócić uwagę, by stworzyć płaszczyznę integracji tych systemów, powinna być odpowiednio prosta, ale spełniająca wymogi ISO 9001 dokumentacja systemowa.

Coraz częściej *Six Sigma* przedstawiana jest, jako element szerszego systemu. Jedną z ciekawszych, dobrze umotywowanych idei integrujących *Six Sigma* z zarządzaniem procesowym jest *Lean Six Sigma*. Jak wskazuje na to nazwa, podejście to stanowi kombinację oszczędnego zarządzania i metodyki *Six Sigma* i zakłada „dostarczanie klientom najwyższej jakości szybciej niż konkurenci". Połączenie *Six Sigma* i *Lean Management* jest bardzo uzasadnione, gdyż:

– *Lean Management* nie dysponuje instrumentarium koniecznym do diagnozowania i zapewnienia stabilności statystycznej (sterowalności) procesów;

– *Six Sigma* nie zapewnia radykalnego przyspieszenia realizowanego procesu, jak również nie przyczynia się zwykle do poprawy jego efektywności.

Part-financed by the European Union (European Development Fund and European Neighborhood and Partnership Instrument) within the BSR QUICK Project