



STATYSTYKA W KOMPLEKSOWYM ZARZĄDZANIU JAKOŚCIĄ¹

*prof. dr hab. inż. Jacek Koronacki, Wyższa Szkoła Informatyki Stosowanej
i Zarządzania pod auspicjami Polskiej Akademii Nauk*

Krótko o kompleksowym zarządzaniu jakością

Celem niniejszego opracowania jest naszkicowanie miejsca, jakie w kompleksowym zarządzaniu jakością (w skrócie, TQM, od terminu angielskiego *total quality management*) zajmują metody statystyczne. Krótko wskażemy dlaczego właściwie pomyślana statystyczna analiza danych jest w rzeczywistości jednym z filarów TQM.

W obecnej dobie żadne przedsiębiorstwo, bez względu na to czy produkcyjne czy usługowe, żadna organizacja - bez względu na jej wielkość, rodzaj produkcji lub usług - nie osiągnie trwałego sukcesu na rynku, jeśli nie będzie w sposób systematyczny dbać o swoją stałą poprawę.

Stała poprawa nie dzieje się automatycznie, lecz jest to zamierzona i zaplanowana właściwość organizacji pojmowanej jako system zbudowany ze współzależnych części składowych. Stała poprawa nie jest zatem możliwa bez zrozumienia jej istoty przez zarząd organizacji – ponieważ to na zarządzie spoczywa odpowiedzialność za „wbudowanie” w organizację zdolności do stałej poprawy. Dobrze pojęte zarządzanie całym systemem oznacza zarazem poszukiwanie sposobów zmniejszenia jego złożoności.

Mówimy tu o organizacji jako o *systemie*, ponieważ przez organizację „przepływają” strumienie pracy, czyli realizowane są specyficznie połączone łańcuchy procesów, wiążące grupy ludzi i wydziały organizacji (przypomnijmy, że formalna definicja systemu powiada, iż systemem jest zbiór wzajemnie zależnych procesów mających wspólny cel). Nastawienie na jakość (i stałą poprawę jakości) wyników działania organizacji każe traktować odbiorców i dostawców organizacji jako części całego systemu. Rzeczywiście, zgadzając się z normą PN-ISO 8402, że jakością dowolnego obiektu jest ogół jego właściwości, wiążących się ze zdolnością tego obiektu do zaspokojenia potrzeb stwierdzonych i oczekiwanych, to oczywiście odwołujemy się tu do potrzeb odbiorcy (przez obiekt rozumiemy tu dowolny produkt, półprodukt, usługę, operację finansową lub księgową, itd.). Z kolei, by móc te potrzeby spełniać w sposób ekonomiczny, i to spełniać je w sposób coraz doskonalszy, musimy umieć zapewnić sobie odpowiednią jakość obiektów dostarczanych nam przez naszych dostawców.

Traktowanie dostawców i odbiorców jako części systemu jest także dlatego logiczne, że pozwala w jednolity sposób patrzeć zarówno na organizację jako całość, jak i na jej części, czyli procesy realizowane wewnątrz organizacji (np. w przypadku procesu toczenia



cylindra w odlewie metalowym dostawcą jest odlewnia, zaś gotowy cylinder ma w tej samej fabryce swojego odbiorcę).

Zauważmy, że – jak się dziś mówi – *sluchanie głosu odbiorcy* wynika z konieczności spełniania aktualnych potrzeb odbiorcy oraz stałej poprawy jakości. Tym sposobem narzuca także konieczność dokonywania innowacji w procesach realizowanych w organizacji oraz w finalnych wyrobach organizacji. (Jak to sugeruje przytoczona definicja jakości, dostawca stara się nie tylko zaspokoić *stwierdzone* potrzeby odbiorcy, ale także *oczekiwane*, czyli również takie, których odbiorca jeszcze sam nie potrafi sformułować, ale które przyjmie jako przez siebie oczekiwane, gdy dostawca zaoferuje mu jakościowo nowy wyrób – nowy produkt lub nową usługę.)

Już z tych uwag wynika, że **strategia stałej poprawy jest zadaniem dotyczącym całej organizacji**, powinna dotyczyć wszystkich aspektów jej działania i wszystkich procesów w niej realizowanych. Inicjatywa jej wdrożenia, odpowiedzialność za jej wdrożenie i działanie, kierowanie jej wdrożeniem i działaniem są zadaniami najwyższego kierownictwa. W uporządkowany sposób odpowiednie zadania są przydzielane niższemu szczeblom kierownictwa, kadrze inżynieryjno-technicznej, kolejnym szczeblom załogi.

Ażeby mogło się to **odbywać w sposób uporządkowany oraz ekonomiczny**, i by jednocześnie oznaczało szukanie sposobów zmniejszenia złożoności organizacji, niezbędne jest opracowanie jasnych i adekwatnych procedur postępowania projakościowego, obejmujących wszystkie aspekty i szczeble działania organizacji. **Procedury muszą tworzyć zintegrowany system**. Muszą mieć charakter procedur standardowych, choć dopuszczających ich uporządkowaną zmianę, jeśli właściwie przeprowadzone badania wykazały, że zmiana taka prowadzi do poprawy. Pierwszej standaryzacji nie wolno przy tym dokonać zbyt wcześnie – kompleksowe i rzeczywiście skuteczne działania projakościowe w organizacji nie dają się wdrożyć z dnia na dzień, ich wypracowanie wymaga doświadczeń i czasu. Przedwczesna standaryzacja z całą pewnością zamieniłaby wspomniane działania w rytuał bez znaczenia i sensu, gdziekolwiek zresztą niestety praktykowany.

Całość tu zarysowanej strategii nosi dziś nazwę kompleksowego zarządzania jakością (TQM). Strategii tej nie będziemy tu omawiać, ponieważ cel niniejszego opracowania jest inny, podamy jednak jeszcze kilka uwag ogólniejszej natury, niekoniecznie bezpośrednio dotyczących miejsca metod statystycznych w TQM.

Za ojca TQM można uznać Waltera Shewharta. Jego praca w Western Electric Company oraz jego fundamentalne dzieło o znamienym tytule *Economic Control of Quality of Manufactured Product*, wydane w roku 1931, otworzyły drogę nowoczesnej myśli o zarządzaniu jakością. W zasadzie Shewhart ograniczył się do tego co dziś nazywamy statystycznym sterowaniem procesem, ale już jego wybitny uczeń, W. Edwards Deming, rozszerzył metodologię swego nauczyciela do całościowej strategii stałej poprawy jakości w organizacji. W pierwszym dziesięcioleciu powojennym istotny wpływ na naukę (a później i praktykę) zarządzania jakością wywarł także kolejny Amerykanin, J.M. Juran. Myśl Deminga nie od razu została doceniona w USA. Dlatego to już w roku 1947, na zaproszenie generała Mc Arthura, Deming znalazł się w Japonii, by tam stać się ojcem



słynnej dziś jakościowej doskonałości produktów japońskich. Również inni jeszcze Amerykanie oraz Japończycy, zwłaszcza profesorowie Kaoru Ishikawa i Genichi Taguchi, dodali swój wkład w teorię i praktykę kompleksowego zarządzania jakością (w roku 1967 Japończycy sformułowali strategię o angielskiej nazwie *company wide quality control*, w skrócie CWQC). Dziś, syntezę tych wszystkich metodologii określamy mianem TQM.

Coraz szerzej obowiązującym na świecie kompendium na temat TQM są normy międzynarodowe PN-ISO serii 9000. Obecnie trwa opracowywanie rewizji normy ISO 9001 (planowane jest jej wydanie w roku 2000, ale wygląda na to, że w roku 2000 ukaże się tylko jej oficjalny projekt, tzw. *draft international standard*, zawsze poprzedzający wydanie dokumentu w ostatecznej postaci). Celem rewizji jest usunięcie wad aktualnej wersji, w tym uczynienie jej bliższą praktyce z zachowaniem jej ogólności oraz uczynienie jej łatwiej stosowalną w małych firmach. Nie ulegną przy tym zmianie zasadnicze wątki normy.

Wszystkie normy serii 9000 dotyczą *systemów jakości*. Norma 9001 dotyczy modelu zapewnienia jakości w projektowaniu, pracach rozwojowych, produkcji, instalowaniu i serwisie, norma 9002 -- modelu zapewnienia jakości w produkcji, instalowaniu i serwisie, norma 9003 – modelu zapewnienia jakości w kontroli i badaniach końcowych. Norma 9004 nosi tytuł *Zarządzanie jakością i elementy systemu jakości – Wytyczne doskonalenia jakości*.

Przykładowo, najszerza z nich, norma PN-ISO 9001, obejmuje 20 wyszczególnionych zagadnień ogólnych: odpowiedzialność kierownictwa; system jakości; przegląd umowy; sterowanie projektowaniem; nadzór nad dokumentacją i danymi; zakupy; nadzorowanie wyrobu dostarczonego przez klienta; identyfikacja i identyfikowalność wyrobu; sterowanie procesem; nadzorowanie wyposażenia do kontroli, pomiarów i badań; status kontroli i badania; nadzorowanie wyrobu niezgodnego z wymaganiami; działania korygujące i zapobiegawcze; postępowanie z wyrobem, jego przechowywanie, pakowanie, zabezpieczanie i dostarczanie; nadzorowanie zapisów dotyczących jakości; wewnętrzne audyty jakości; szkolenie; serwis; metody statystyczne.

Podane hasła dobitnie ilustrują sensu stricto kompleksowy charakter zarządzania jakością w organizacji. Wniknięcie w treść norm serii 9000 pozwala dostrzec, iż prawdziwym fundamentem TQM jest następująca prawda:

♦ **Zasadniczą rolę w każdej organizacji odgrywa dbałość o jakość procesów, prowadzących do uzyskania końcowego efektu działania systemu. Jakość końcowego efektu (czyli jakość finalnego produktu lub usługi) jest konsekwencją dbałości o jakość procesów. Musimy patrzeć pod prąd i koncentrować się na źródle jakości końcowej – na projekcie produktu lub usługi i na procesach realizowanych w organizacji. Jeśli tak nie czynimy, zachowujemy się jak kierowca, który prowadzi samochód nie patrząc się przed siebie lecz obserwując białą linię w lusterku wstecznym. Jeśli natomiast tak postępujemy, otwieramy drogę do zapobiegania problemom zawczasu, unikania błędów, redukcji zmienności w organizacji oraz stałego doskonalenia procesów i organizacji jako całości.**



Choć normy serii 9000 tego niestety explicite nie pokazują, ani zmiany projektowe, ani dbałość o jakość procesów nie mogą się obejść bez szerokiego stosowania metod statystycznych. Jak bardzo prawdziwe jest to stwierdzenie, pokażą zrewidowane normy, ponieważ towarzyszyć im będą dokumenty wskazujące jakie narzędzia i techniki należy lub można stosować dla zrealizowania konkretnych zadań projakościowych. Od kilku lat pokazuje to już norma przyjęta przez tzw. Wielką Trójkę, czyli trzy amerykańskie koncerny samochodowe, Chryslera, Forda i GM (Opel). Norma ta, znana jako QS 9000 (*Quality System Requirements*), wraz z normami jej towarzyszącymi (*Quality System Assessments, Production Part Approval Process, Potential Failure Mode Effects Analysis, Fundamental Statistical Process Control, Measurement System Analysis, Advanced Product Quality and Control Plan*) jest zbiorem dokumentów zgodnych z normami ISO 9000, ale nieporównanie bardziej szczegółowym i konkretnym, wskazującym jak, gdzie i co stosować. Zbiór standardów QS 9000 adresowany jest do dostawców wewnętrznych i zewnętrznych. W przypadku dostawców zewnętrznych Wielka Trójka wymaga certyfikacji działań projakościowych wg standardu QS od dostawców dwóch poziomów – od swoich dostawców bezpośrednich oraz od dostawców bezpośrednich tych ostatnich. Standardy QS są dziś dokumentami szeroko uznanymi na świecie już choćby dlatego, że Wielka Trójka ma kooperantów nieomal wszędzie.

Zarówno normy PN-ISO jak i normy QS stawiają konkretne wymagania dostawcom wewnętrznym i zewnętrznym oraz ustalają ich odpowiedzialność za spełnianie tych wymagań. To z kolei oznacza uruchomienie kompleksowych, dobrze określonych i uporządkowanych działań projakościowych. W ten sposób zrealizowany może zostać wcześniej już sformułowany cel zarządzania jakością: zapobieganie problemom zawczasu, unikanie błędów, redukcja zmienności w organizacji oraz stałe doskonalenie procesów i organizacji jako całości.

Przejsie od procedur „menedżerskich” do działania najczęściej oznacza odwołanie się do pomocy metod statystycznych. Metody te wskazują, jak zbierać informacje o procesie. Chronią – także kadre kierowniczą -- przed niewłaściwą interpretacją danych i podejmowaniem pochopnych decyzji. Są niezastąpione już choćby dlatego, że najlepiej (z metodologicznego i praktycznego punktu widzenia) nadają się do analizy danych i zmienności w nich ukrytej.

Analiza zmienności

Znajomość teorii zmienności jest jednym z najpotężniejszych narzędzi, jakimi przedsiębiorstwo może się posłużyć. Pozwala usprawnić organizację, więcej, stwarza możliwości stałej jej poprawy. Jest kluczowym elementem w „układance”, jaką musi złożyć kierownictwo przedsiębiorstwa, jeśli chce by przedsiębiorstwo prawidłowo funkcjonowało.

Ludzie, którzy nie rozumieją zmienności:

- ♦ podejmują złe decyzje i działania;
- ♦ dostrzegają trendy tam, gdzie ich nie ma;



- ◆ próbują przedstawić naturalną zmienność jako zdarzenia o specjalnym znaczeniu;
- ◆ karzą i nagradzają ludzi za rzeczy, na które ci ludzie nie mają wpływu;
- ◆ nie rozumieją dotychczasowego działania (przedsiębiorstwa, procesu produkcji itd.);
- ◆ nie mogą poprawnie przewidywać lub podejmować planów na przyszłość;
- ◆ mają ograniczoną zdolność czynienia usprawnień.

Każda mierzona zmienna wyjściowa oraz każda mierzona zmienna procesu charakteryzuje się pewną zmiennością. Metoda pomiaru może nie być w stanie wykryć tej zmienności, ponieważ zmienność może być zbyt mała, pomiar zmienności może być niemożliwy z innych względów, ale zmienność zawsze jest (w przykładzie, do którego wrócimy niżej, odbiorca pewnych samochodowych skrzyń biegów mógł dojść do wniosku, że średnice ich wałów głównych charakteryzuje *brak* zmienności – rzecz jednak polegała na tym, że zmienność była o dwa rzędy wielkości mniejsza od dopuszczanej przez granice tolerancji i stosowane przez odbiorcę aparaty pomiarowe były zbyt niedokładne).

Zmienność występująca w każdym procesie lub systemie jest nieunikniona, ale jeżeli jest zbyt duża, koszt jej istnienia może okazać się nieproporcjonalnie wysoki, czy to jako koszt materiałów, czy jako koszt utrzymania obiektu, koszt wynagrodzeń, czy koszt wynikły z czasochłonności przedsięwzięcia. Zmienność może zdusić zdolności twórcze i innowacyjne, może też nadwzględlić lub wręcz zniszczyć dobre imię organizacji.

Na przykład:

- ◆ wyrób (usługa) może nie spełniać wymagań odbiorcy;
- ◆ części (moduły) mogą do siebie źle pasować lub wręcz nie pasować;
- ◆ dostawy mogą nadchodzić zbyt nieregularnie, by zachować płynność produkcji bez rozbudowy magazynów;
- ◆ zbytne opóźnienia w płatnościach mogą spowodować kłopoty finansowe lub utratę kooperanta;
- ◆ zła obsługa może spowodować utratę klientów.

Wspomniana już historia wałów głównych skrzyni biegów o rzekomo niezmiennych średnicach była słynna w kręgach konsultantów-statystyków w końcu lat 80-tych. Odbiorcą wałów był jeden z największych na świecie koncernów samochodowych, ich dostawcą były dwie firmy, japońska i 'niejapońska'. O jakości wałów japońskich napisaliśmy już wcześniej. Ale także wały niejapońskie były zgodne ze specyfikacjami, średnice leżały w granicach tolerancji, choć wykrycie zmienności ich średnic nie wymagało użycia żadnej specjalnej aparatury. I nikt nie przejąłby się różnicą jakości jednych i drugich wałów, gdyby nie pewna specyficzna grupa klientów kupujących samochody koncernu. Otóż robotnicy zatrudnieni w zakładach montujących samochody zauważyli, że zmiana biegów w samochodach z wałami japońskimi jest gładzsza i przeto starali się kupować samochody z takimi właśnie wałami. Kierownictwo zakładu zostało przez sprzedawców poinformowane o zachowaniu robotników, i stąd w ogóle wzięły się dodatkowe pomiary wałów, a w rezultacie walka o poprawę wizerunku koncernu.



Redukcja zmienności jest koniecznością. Niezbędne jest zatem zrozumienie natury zmienności. Do niedawna ze zrozumieniem zmienności przez kadre kierowniczą i skutkiem tego przez załogi organizacji przemysłowych, usługowych i finansowych Zachodu było zaskakująco źle. Gdyby było dobrze, zachodnie koncerny samochodowe nie ustąpiłyby tyle pola koncernom japońskim, na początku lat 90-tych w Nowym Jorku nie doszłoby do sześciogodzinnej przerwy w międzymiastowej łączności telefonicznej i przez to do paraliżu naziemnej kontroli ruchu powietrznego nad tamtym terytorium, itd, itp.

Tymczasem nowoczesna teoria i praktyka zmniejszania zmienności liczy już sobie około 75 lat. Western Electric Company w Chicago miało w roku 1924 kłopoty z wytworzeniem sprzętu telefonicznego możliwie jednolitego i całkowicie niezawodnego. Początkowo udawało się poprawiać jakość sprzętu, ale po osiągnięciu pewnego poziomu okazało się, że często coraz bardziej intensywne wysiłki zmniejszenia zmienności prowadziły do efektu odwrotnego do zamierzonego. Firma zaprosiła do pomocy młodego fizyka z Bell Laboratories, Waltera Shewharta, który odkrył, że na zmienność każdego z procesów cząstkowych (podprocesów procesu produkcji) składały się dwa, jakościowo odmienne, typy zmienności:

- ◆ **Zmienność „własna”, wynikająca z przyczyn „losowych”, zwanych też „ogólnymi”,** które pełnią rolę „szumu” stale obecnego w tym procesie. Przyczyny te są zawsze obecne i mogą ulec zmianie jedynie w przypadku zmienienia w jakiś sposób procesu. Na żadnej konkretnej tokarce, doskonale sprawnej i pracującej w zdawałoby się tych samych warunkach, nie uda się wyprodukować dwóch idealnie takich samych wałków. Jeżeli zmienność ich średnic nam nie odpowiada, możemy zmienić tokarkę, albo możemy zmienić technologię otrzymywania odlewów, z których toczymy wałki, ale to będzie już równoznaczne ze zmianami procesu – odtąd analizie będzie w istocie poddawany inny proces. Z tym, że i tym razem będzie się ten proces charakteryzował jakąś zmiennością średnicy wałka, może nawet o rząd mniejszą, ale na pewno nie zerową. Innym przykładem procesu może być realizowanie przez firmę płatności – każdej ustalonej procedurze realizacji będzie towarzyszyć jakaś zmienność (czasu do zrealizowania płatności, procentu płatności niezrealizowanych na czas) wynikająca z przyczyn ogólnych, czyli zmienność własna.
- ◆ **Zmienność wynikająca z przyczyn „wyznaczalnych”, zwanych też „specjalnymi”,** które pełnią rolę „sygnałów” (ta ostatnia nazwa bierze się stąd, że obecność takiej zmienności można wykryć dzięki umiejętności identyfikacji sygnałów na tę obecność wskazujących). Przyczyny specjalne występują sporadycznie (choć od chwili wystąpienia takiej przyczyny, jej działanie może już nie ustąpić). Generalnie biorąc przyczyny specjalne wpływają na procesy w sposób niemożliwy do przewidzenia i zwykle zwiększają zmienność. Może być to chwilowe drganie łożyska tokarki albo stępienie fragmentu noża. W drugim przykładzie może np. wystąpić nieprzewidziane i nietypowe wydłużenie czasu realizacji płatności skutkiem tego, że pojawiły się płatności nowego typu, albo też dlatego, że zatrudniono dodatkowych księgowych.

To zdawałoby się proste odkrycie Shewharta było zarazem odkryciem genialnym. Bez niego, systematyczne, konsekwentne i skuteczne zmniejszanie zmienności byłoby niemożliwe. Shewhart był twórcą statystycznego sterowania procesami (w skrócie SPC od



ang. *statistical process control*). Jak już wspomnieliśmy, idee SPC stworzyły podwaliny pod całościową filozofię zarządzania według Deminga.

Odkrycia i metody Shewharta, całe SPC stosuje się nie tylko do systemów produkcji, ale do dowolnych innych systemów, w tym do usług, do systemów remontowych, administracyjnych, księgowości, analiz finansowych, sprzedaży, itd.

O tym, że podane obserwacje Shewharta mają kapitalne znaczenie, świadczą następujące, wypływające z nich wnioski:

- ◆ Wszystkie zbiory danych zawierają *szum* (związany z istnieniem przyczyn ogólnych); niektóre zbiory danych zawierają również *sygnały* (wynikłe z zaistnienia przyczyn specjalnych).
- ◆ Pierwszym krokiem na drodze do kierowania jakimkolwiek procesem i zmniejszenia jego zmienności jest rozróżnienie między ogólnymi i specjalnymi przyczynami obecnej zmienności.
- ◆ Ponieważ charakter obydwu rodzajów zmienności jest jakościowo diametralnie odmienny, każdy z nich wymaga zupełnie innych sposobów zmniejszania zmienności.
- ◆ W przypadku gdy występują specjalne przyczyny, wyjście procesu nie jest stabilne w czasie i nie możemy nic powiedzieć o tym jakiej zmienności należy oczekiwać w najbliższej przyszłości. Do chwili zidentyfikowania i usunięcia wszystkich istotnych specjalnych przyczyn zmienności procesu, przyczyny te wpływają na proces i jego wyjście w nieprzewidywalny sposób. Jeśli wystąpi drganie łożyska tokarki, jakość toczonych elementów nagle się istotnie pogorszy, by znowu poprawić się, gdy drganie ustąpi. Przyczyny specjalne w nieprzewidywany sposób wpłyną na wyniki finansowe firmy. W rezultacie, w przypadku występowania przyczyn specjalnych, niemożliwe jest ocenienie efektów zmian w projekcie, efektów zmian w przygotowaniu pracowników, efektów zmiany materiałów od dostawcy itd. **Systematyczne identyfikowanie i usuwanie specjalnych przyczyn zmienności procesu jest zatem niezbędnym i koniecznym pierwszym krokiem na drodze do zmniejszenia zmienności procesu.**
- ◆ Zmienność wynikająca z istnienia przyczyn ogólnych może być zmniejszona jedynie w wyniku poprawienia samego procesu. Wynika stąd, że **w przypadku gdy w procesie lub systemie obserwuje się jedynie jego zmienność własną, poprawę można osiągnąć wyłącznie dzięki działaniom kierownictwa, zmieniającym ów system lub proces.**

System, z którego usunięto specjalne przyczyny zmienności, nazywany jest *stabilnym*. Mówimy wówczas również, że system jest w stanie *statystycznego uregulowania*. Systemem stabilnym jest zatem taki system, którego zachowanie jest przewidywalne w granicach wynikających z istnienia jedynie ogólnych przyczyn zmienności. Ze znaną dokładnością możemy przewidzieć czas realizacji płatności lub średnicę toczonych wałków. **System, który jest stabilny, charakteryzuje się najmniejszą możliwą dlań zmiennością - tylko zmiana samego systemu może jeszcze zredukować zmienność.** Stabilność procesu nie jest jego stanem naturalnym.



To że proces jest stabilny **nie** oznacza, iż jego zachowanie jest zadowalające. Wyjście może nie spełniać wymagań odbiorcy przez pewien lub cały czas. Przy tym, całkowita zmienność własna określa „**zdolność**” procesu. Cel, który wykracza poza zdolność procesu nie może być osiągnięty inaczej niż przez zmianę tego procesu lub zepsucie innych procesów w systemie (w produkcji wieloasortymentowej przykładem mogą być wykraczające poza zdolność procesu wymagania odbiorcy dotyczące jednego z wyrobów). Wynika z tego, że ustalanie arbitralnych celów (wyrażanych np. liczbowo), bez podania sposobów ich osiągnięcia, z dużym prawdopodobieństwem okazuje się być szkodliwe dla przedsiębiorstwa i stresujące dla osób zaangażowanych w osiągnięcie tych celów.

Zarówno poszukiwanie sygnałów jak i analizę zdolności procesu prowadzi się za pomocą narzędzi statystycznych. W szczególności, bardzo prostym i zadziwiająco skutecznym narzędziem wykrywania wystąpienia w procesie sygnałów są **karty kontrolne** zaproponowane przez Shewharta. Po krótkiej nauce podstawowe karty mogą być stosowane przez każdego. Nie są pomyślane jako środek, którym mogą się posługiwać tylko statystycy ‘eksperti’.

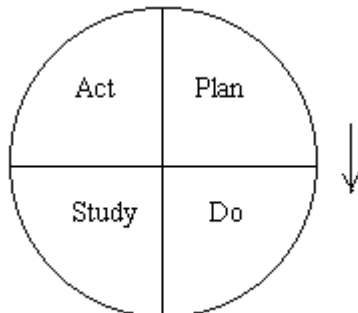
Karty kontrolne to w rzeczywistości *karty przebiegu procesu* z granicami kontrolnymi, tzn. granicami pokazującymi zakres losowej zmienności własnej, umieszczonymi trzy odchylenia standardowe ponad i trzy pod wartością średnią (dokładniej konstrukcja kart kontrolnych opisana jest w opracowaniu poświęconym metodom statystycznego sterowania jakością). Upraszczając, na kartę nanosi się w kolejnych chwilach zaobserwowane wartości wielkości mierzonej w procesie (nanoszoną wartością może np. być średnica toczonego wałka lub – lepiej -- średnia średnic z kilku pomiarów, jeśli zdecydowaliśmy się mierzyć w regularnych odstępach czasu po kilka średnic wałków schodzących z obrabiarki). Punkty znajdujące się poza obszarem wyznaczonym tymi granicami można uznać za wyniki z zaistnienia przyczyn specjalnych. Tak samo jest z punktami, które leżą wprawdzie między granicami kontrolnymi, ale tworzą pewną specyficzną konfigurację. W przypadku wystąpienia przyczyny specjalnej należy znaleźć jej źródło.

Analiza i zmiana procesu

Zwróciliśmy już uwagę, że strategia zmniejszania zmienności i tym sposobem poprawiania jakości jest dwójakiego typu:

- ♦ Z chwilą wykrycia istnienia przyczyny specjalnej należy podjąć jej zbadanie, znaleźć jej źródło i ją usunąć lub wyodrębnić (nie wszystkie przyczyny specjalne są szkodliwe.) Ludźmi najlepiej przygotowanymi do podjęcia tych działań są operatorzy procesu wspomagani przez swoich przełożonych. Do wykrywania sygnałów służą karty kontrolne.
- ♦ W przypadku, gdy proces lub system jest stabilny (nie występują żadne przyczyny specjalne), błędem jest reagowanie na pojedyncze zdarzenia lub dane. Poprawę może przynieść wyłącznie dokonanie zmiany w procesie lub systemie. Metodologiczną podstawę takiego postępowania stanowi cykl PDSA (od ang. *plan-do-study-act*, czyli zaplanuj-wykonaj-zbadaj-działaj), zwany też cyklem PDCA (od ang. *plan-do-check-*

act, czyli z ‘sprawdź’ zamiast ‘zbadaj’). Cykl PDSA jest **spirala** ciągłej poprawy. Działanie to leży w kompetencjach kierownictwa odpowiedniego szczebla, ono tylko bowiem jest władne wprowadzać zmiany w procesie.



Cykl PDSA jest koncepcyjnie zupełnie oczywisty i naturalny. W przypadku procesu stabilnego wysiłek na rzecz zmniejszenia jego zmienności własnej musi zacząć się od zaplanowania zmiany (stąd termin *zaplanuj*). Krokiem następnym jest dokonanie owej zmiany (stąd *wykonaj*). Z kolei konieczne staje się zbadanie skutków zmiany (*zbadaj*) i ostatecznie wyciągnięcie wniosków, czyli podjęcie adekwatnego działania (*działaj*). Warto przy tym zauważyć, że ocena skutków zmiany wymaga najpierw ustabilizowania procesu po zmianie. Jeśli zmiana okazuje się prowadzić do rzeczywistej poprawy, proces zostaje zmieniony. Jeśli nie, potrzebne jest powtórzenie cyklu PDSA. Ostatecznie zmieniony i dzięki temu poprawiony proces może zostać poddany kolejnemu udoskonaleniu zgodnie z zasadami cyklu PDSA.

Strategia działania zmierzająca do zmniejszenia zmienności własnej procesu musi zatem być zupełnie inna niż strategia usuwania zmienności wynikłej z istnienia przyczyn specjalnych. Po pierwsze, proces musi zostać lepiej poznany, by możliwa była jego sensowna zmiana. Mamy tu trzy podstawowe drogi dochodzenia do lepszego poznania procesu: **stratyfikację** danych, **zaplanowany eksperyment** oraz **dekompozycję** procesu. Stratyfikacja to podział danych na podzbiory należące do różnych kategorii i oddzielne analizowanie danych każdej kategorii (np. organizacja zainteresowana analizą różnic między budżetem zaplanowanym dla jej inwestycji budowlanych oraz kosztami rzeczywiście poniesionymi może wspólnie badać inwestycje ‘duże’ i ‘małe’, zaś wspomniane różnice mogą się zachowywać różnie w tych dwóch kategoriach – warto więc oddzielnie rozważyć dwa procesy: różnic w przypadku małych inwestycji i różnic w przypadku dużych inwestycji). Eksperyment polega na zaplanowanej zmianie w procesie i obserwacji efektu tej zmiany. Dekompozycja polega na ‘rozłożeniu’ procesu na mniejsze części, też będące procesami (podprocesami procesu oryginalnego) i następnie na oddzielnej analizie podprocesów.

Stratyfikacja, o której tu mowa, jest zamierzonym działaniem analityka procesu i nie jest związana z wystąpieniem jakiegokolwiek sygnału (proces jest stabilny, zaś zadaniem analityka jest zmniejszenie zmienności własnej tego procesu). Czymś innym jest stratyfikacja czyli uwarstwienie obserwacji nanoszonych na kartę kontrolną – takie



uwarstwienie uwidacznia się na karcie kontrolnej jako sygnał w postaci specyficznej konfiguracji punktów na karcie kontrolnej. Uwarstwienie jest tu przyczyną wyznaczalną, proces jest niestabilny, zaś całe badanie dotyczy analizy zmienności, a nie analizy procesu już ustabilizowanego. (Z uwarstwieniem obserwacji mamy np. często do czynienia, gdy w każdej kolejnej chwili dokonujemy pomiarów grubości formowanej płyty w kilku ustalonych punktach przekroju płyty – szerokość na brzegu bywa różna od szerokości w środku przekroju.)

Zarówno w zaplanowaniu zmiany jak i ocenie jej skutków znowu najczęściej niezbędne jest użycie metod statystycznych. Zmiana procesu oparta na zamierzonej stratyfikacji lub dekompozycji procesu prowadzi do powtórzenia badań nad zmiennością i zdolnością nowego procesu. Zaplanowany eksperyment jest działaniem bardziej złożonym. **Głównie są to metody związane z planowaniem doświadczeń, analizą regresji, analizą danych wielowymiarowych oraz optymalizacją statystyczną.** Zwykle nie są to już metody tak proste jak np. karty kontrolne, ale też pytania, na które mają odpowiedzieć są znacznie trudniejsze. Informacjom na temat tych metod poświęcone są inne opracowania niniejszego seminarium.

¹ Niniejszy tekst oraz sąsiadujący z nim tekst nt. metod statystycznego sterowania jakością jest znacznie rozszerzoną i zmodyfikowaną wersją opracowania J. Murraya i J. Koronackiego, jakie ukazało się w materiałach *Międzynarodowej Szkoły Jakości*, Mrągowo, 20-22 października 1999, wydanych przez UNDP.

METODY STATYSTYCZNEGO STEROWANIA JAKOŚCIĄ

*prof. dr hab. inż. Jacek Koronacki, Wyższa Szkoła Informatyki Stosowanej
i Zarządzania pod auspicjami Polskiej Akademii Nauk*

Uwagi wstępne

Tekst ten należy traktować jako drugą część opracowania *Statystyka w kompleksowym zarządzaniu jakością*.

Sterowanie jakością to wg normy terminologicznej PN-ISO 3534:2 metody i działania stosowane w celu spełnienia wymagań jakościowych. Dziś musimy dodać, iż spełnianie wymagań należy traktować dynamicznie – nie chodzi o wymagania raz na zawsze ustalone przez takie czy inne specyfikacje, lecz o stałą poprawę jakości procesów oraz produktów lub usług. Statystyczne sterowanie jakością to po prostu część sterowania jakością korzystająca z technik statystycznych.

Zadania spełniane w ramach tego działu sterowania jakością można z grubsza podzielić na następujące:

- ◆ statystyczne sterowanie procesem;
- ◆ analiza zdolności procesu lub maszyny;
- ◆ kontrola odbiorcza;
- ◆ analiza pomiarów;
- ◆ planowanie doświadczeń i ocena ich wyników.

Statystyczne sterowanie procesem (w skrócie SPC od terminu angielskiego *statistical process control*) to bieżąca – czyli realizowana w rzeczywistym czasie przebiegu procesu – kontrola procesu, służąca wykrywaniu jego ewentualnych rozregulowań i w konsekwencji służąca stałej poprawie jakości procesu. Często mówi się, że w ramach wąsko rozumianego SPC słucha się tylko *głosu procesu* – nie pytamy, czy proces realizuje zadanie, które chcielibyśmy by realizował, lecz badamy co i z jaką zmiennością proces realizuje. Jeśli jest to proces toczenia wałków, pytamy np. o to, jakie są średnice toczonych wałków, jaka jest średnia wartość owych średnic i jakie jest rozproszenie otrzymywanych wartości średnic. Interesuje nas stabilność procesu toczenia, a nie np. to jak się ma średnia wartość średnic do ich wartości pożądanej (nominalnej). Analiza zdolności procesu odpowiada na pytanie na ile możliwe jest realizowanie przez dany proces zadania, którego wykonaniu ma ten proces służyć (stosując odpowiednie miary odpowiadamy np. jaka jest zdolność procesu do toczenia wałków o danych specyfikacjach). Kontrola odbiorcza służy np. zapewnieniu by ryzyko odbiorcy (prawdopodobieństwo przyjęcia partii wyrobów, gdy ich poziom jakości jest niezadowolający) oraz ryzyko dostawcy (prawdopodobieństwo odrzucenia partii



wyrobów, gdy ich poziom jakości jest zadowalający) pozostawały w ustalonych granicach. Analiza pomiarów bada jakość pomiarów. Bez znajomości stopnia wiarygodności dokonywanych pomiarów niemożliwe jest odpowiedzialne wnioskowanie na podstawie otrzymywanych wyników pomiarów. Planowanie doświadczeń i ocena ich wyników to zestaw statystycznych technik, które najpierw pozwalają zaplanować doświadczenie, dające możliwie najlepszy opis związków między zmiennymi analizowanego procesu, i które następnie pozwalają zaproponować pożądaną zmianę tego procesu (prostym przykładem może być obróbka cieplna pewnych odlewów, zadaniem dobranie czasu nagrzewania odlewów, temperatury pieca oraz czasu utrzymania temperatury w piecu, zwiększających wytrzymałość odlewów na zginanie).

Często analizę zdolności procesu lub maszyny, kontrolę odbiorczą i analizę pomiarów przedstawia się jako części dziedziny SPC. Czyni się tak, ponieważ wszystkie wymienione dziedziny są bezpośrednio związane z analizą zmienności procesu. Z drugiej strony, na przykład wstępna analiza zdolności (por. ostatni rozdział tego opracowania) zawiera również analizę innych charakterystyk procesu, nie tylko jego zmienności.

W dalszym ciągu niniejszego opracowania krótko omówione są karty kontrolne, czyli podstawowe narzędzia SPC, oraz – w jeszcze większym skrócie -- omówiona jest analiza zdolności procesu. Opracowanie nie jest poradnikiem jak z omawianych metod korzystać w praktyce, choć nawiązuje do tego kręgu zagadnień.

Podstawowe karty kontrolne

Ogólne zasady konstrukcji karty:

- ♦ Karta kontrolna obrazuje dane lub podzbiory danych, wykreślane w funkcji czasu, z linią centralną pokazującą ogólną wartość średnią tych danych. (Zamiast wartości średniej, linia centralna może pokazywać medianę.)
- ♦ Granice kontrolne są liniami pokazującymi granice naturalnej zmienności. Nanoszone są w odległości trzech odchyłeń standardowych (3σ) od linii centralnej (sposób obliczania tej odległości podany jest niżej). Obserwacje pochodzące z procesu stabilnego (w stanie statystycznego uregulowania) pozostają między granicami kontrolnymi. Pojawienie się wyniku obserwacji poza pasem stabilności procesu (zmienności własnej) jest sygnałem. Sygnałem jest także ułożenie się wyników obserwacji w jedną ze specyficznych konfiguracji, mimo że żaden z wyników nie leży poza pasem stabilności (są to tzw. seryjne sygnały rozregulowania).
- ♦ Specyfikacje, granice tolerancji -- czyli *głos odbiorcy* -- nie powinny być nanoszone na karty kontrolne.

Trzy karty kontrolne Shewharta

Są to najczęściej stosowane karty kontrolne.

1. Karta XmR: Karta ta jest szczególnie użyteczna, gdy dane napływają rzadko (np. zbiorcze wyniki na szczeblach kierowniczych). Może być zastosowana do danych



liczbowych. Karta ta składa się z karty wartości X , czyli w naszym przypadku karty, na którą nanosi się kolejne, pojedyncze wyniki pomiarów interesującej nas wielkości, oraz z karty wartości *rozstępu ruchomego*. Mając zaobserwowane w kolejnych chwilach 1, 2, ..., n wyniki X_1, X_2, \dots, X_n , wartości te nanosimy na kartę X tak, jak to pokazuje dalej rysunek przykładowej karty z $n=25$. *Rozstęпами ruchomymi* nazywamy bezwzględne wartości różnic między dwoma kolejnymi wynikami: $|X_2 - X_1|, |X_3 - X_2|$ itd. (Inna sprawa, że karta rozstępu ruchomego jest niekiedy pomijana, ponieważ w dużym stopniu odzwierciedla ona to, co pokazuje karta X . Pojedyncza, nietypowa (duża lub mała) wartość na karcie X wpływa na dwie wartości rozstępu, dając dwa 'skoki' na karcie ruchomego rozstępu, odpowiadające 'skokowi' na karcie X .)

1.1. 3σ oblicza się na podstawie *rozstępow* między dwiema kolejnymi wartościami pojedynczymi. Tak obliczone wartości rozstępu są zawsze nieujemne.

1.2. W przypadku karty X :

$$3\sigma = 2.66 R\acute{s}r,$$

gdzie $R\acute{s}r$ jest średnią wartością rozstępow.

$$\text{G\o}rna granica kontrolna (UCL) = X\acute{s}r + 2.66 R\acute{s}r,$$

gdzie $X\acute{s}r$ jest średnią wartością zaobserwowanych wyników pomiar\o{w}.

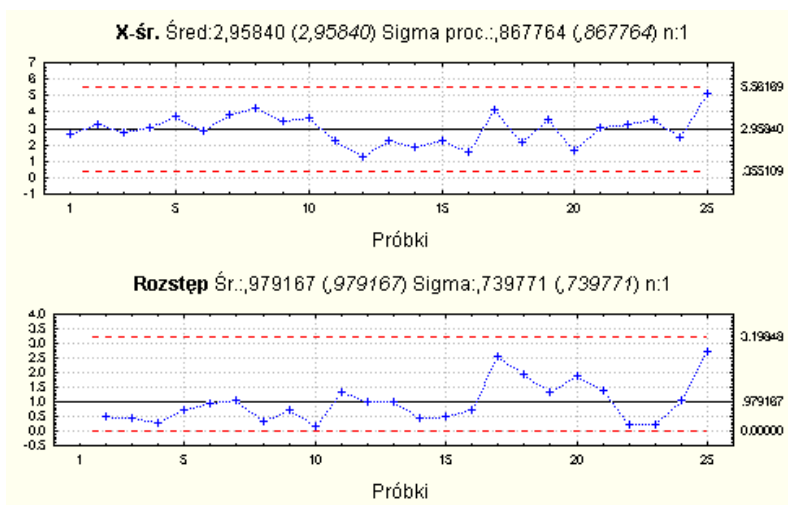
$$\text{Dolna granica kontrolna (LCL)} = X\acute{s}r - 2.66 R\acute{s}r.$$

1.3. W przypadku karty mR:

$$\text{G\o}rna granica kontrolna (UCL) = 3.27 R\acute{s}r.$$

Dolna granica kontrolna r\o{wna} jest zawsze zeru.

1.4. 3σ musi być obliczane korzystając z wartości rozstępow, tak jak to wyżej opisano. **Nie należy** stosować kalkulatora lub komputera obliczającego 3σ na podstawie wszystkich danych zebranych w jeden zbi\o{r}.





2. **Karta X_{sr}-R:** Stosowana jest wtedy, gdy dane liczbowe mogą być pogrupowane w „racjonalne” podgrupy (próbki) o tej samej liczności (np. seryjna produkcja części). Na podgrupy składa się zwykle trzy do pięciu wartości. Granice kontrolne oblicza się na podstawie zmienności wewnątrz podgrup i dlatego podgrupy powinny być tak dobierane by - na ile to tylko możliwe -- w każdej z nich występowała tylko zmienność własna. Gdyby podgrupy były zbyt liczne, łatwiej mogłyby zawierać w swojej zmienności także zmienność wynikającą z istnienia przyczyn specjalnych.

2.1. Obliczamy średnią X_{sr} oraz rozstęp R każdej podgrupy; rozstęp jest równy różnicy między największą i najmniejszą wartością w podgrupie.

2.2. W przypadku karty R:

R_{sr} (linia centralna) = średnia rozstępów w podgrupach,

Górna granica kontrolna (UCL) = D₄ R_{sr},

Dolna granica kontrolna (LCL) = D₃ R_{sr},

gdzie D₃ i D₄ są znanymi współczynnikami liczbowymi o wartościach zależnych od liczności podgrup. W przypadku podgrup o liczności 6 lub mniej, D₃=0, skąd LCL=0. (Najczęściej potrzebne w praktyce współczynniki są podane w tabelce.)

2.3. W przypadku karty X_{sr}:

X_{sr, sr} (linia centralna) = średnia wartość średnich w podgrupach (czyli średnia ogólna),

Górna granica kontrolna (UCL) = X_{sr, sr} + A₂ R_{sr},

Dolna granica kontrolna (LCL) = X_{sr, sr} - A₂ R_{sr},

gdzie A₂ jest znanym współczynnikiem liczbowym o wartościach zależnych od liczności podgrup (patrz tabelka). Wartość wielkości A₂ R_{sr} jest oszacowaniem na podstawie danych wartości trzech odchyłeń standardowych procesu, czyli trzech odchyłeń standardowych zmienności w podgrupach, 3σ.

Tabela współczynników do konstrukcji kart kontrolnych:

N	A ₂	D ₃	D ₄
2	1.88	0	3.27
3	1.02	0	2.57
4	0.73	0	2.28
5	0.58	0	2.11
6	0.48	0	2.00
7	0.42	0.08	1.92

(Podane wartości zależą od liczności podgrup n)

3. **Karta X_{sr}-S:** Jest to karta podobna do karty X_{sr}-R. Jedyna różnica w porównaniu z tą ostatnią polega na tym, że inaczej szacuje się odchylenia standardowe w podgrupach



i w konsekwencji inaczej też oblicza się wartość trzech odchyłeń standardowych procesu, 3σ . W przypadku karty \bar{X} -R szacowanie oparte jest na rozstępach w podgrupach, zaś w przypadku karty \bar{X} -S na próbkowych odchyleniach standardowych w podgrupach.

W przypadku karty kontrolnej dowolnego typu potrzeba około 25 wartości do naniesienia na kartę, by móc skonstruować wiarygodne granice kontrolne (oznacza to potrzebę uzyskania wyników pomiarów dla 25 podgrup w przypadku kart \bar{X} -R). Tym niemniej, jeżeli liczność danych jest mocno ograniczona (np. comiesięczne dane na poziomie zarządzania), można wówczas granice kontrolne obliczać na podstawie mniejszej liczby wartości. Około 15 wartości pozwala zwykle na skonstruowanie stosunkowo wiarygodnych granic. Nawet 10 lub nieco mniej wartości może pozwolić na rozpoczęcie pracy z kartami kontrolnymi. Ale 6 lub mniej wartości, to już strzelanie na oślep.

Wbrew tezie niektórych ‘teoretyków’, nie jest prawdą, że zdecydowanie się na granice 3-sigmowe było wyłącznie wynikiem zastosowania teorii prawdopodobieństwa, choć wybór ten rzeczywiście był zgodny z ową teorią. Karty Shewharta są oparte nie tylko na teorii, ale i na praktyce. Granice kontrolne mają ścisłą interpretację probabilistyczną, gdy nanoszone na karty wyniki pomiarów są od siebie niezależne i pochodzą z rozkładu normalnego. Ale już Shewhart zdawał sobie sprawę, że niezbyt drastyczne odstępstwa zarówno od założenia niezależności jak i od założenia normalności rozkładu nie mają wpływu na wiarygodność wnioskowania na podstawie jego kart kontrolnych. Trafność podanego wyboru granic kontrolnych ma swoje zasadnicze uzasadnienie nie w teorii prawdopodobieństwa a w praktycznym doświadczeniu pochodzącym z ich stosowania.

Powyższa uwaga nie ma sugerować, że nigdy nie jest celowe stosowanie kart innych typów, wymagających głębszej wiedzy, np. wykorzystujących informację, że dane mają pewien ustalony rozkład prawdopodobieństwa, różny od normalnego. Konieczne jest jednak podkreślenie faktu, że stosowalność omówionych kart kontrolnych wykracza bardzo daleko poza przypadek dysponowania danymi o rozkładzie normalnym.

W opracowaniu *Statystyka w kompleksowym zarządzaniu jakością* zwróciliśmy już uwagę, że nierozróżnianie zmienności własnej oraz wynikłej z istnienia przyczyn specjalnych prowadzi do jednego z następujących błędów:

◆ Błąd pierwszego rodzaju:

Reagowanie na przyczyny ogólne, jakby były to przyczyny specjalne (sygnały) – jest to podejmowanie działań bez potrzebnej wiedzy, ‘majsterkowanie’ przy procesie, które zwykle tylko pogarsza sytuację. Poszukiwanie przyczyn i podejmowanie działań naprawczych jest stratą czasu, jeśli nie występuje przyczyna specjalna.

◆ Błąd drugiego rodzaju:

Uznanie, że każda zmienność jest właściwa procesowi lub systemowi, czyli, że każda zmienność procesu lub systemu jest zmiennością własną, i ignorowanie przyczyn specjalnych (sygnałów), gdy te istnieją. Każdy taki przypadek to stracona okazja do poprawy. Takie straty mogą być bardzo kosztowne, tym bardziej, że przyczyny specjalne mają tendencję do powtarzającego się i coraz mocniejszego występowania.



Szczególnie często popełniany jest błąd pierwszy. Na przykład kierownictwo organizacji zarządza sprawdzenie tych z dwudziestu jej inwestycji budowlanych, których rzeczywisty budżet okazał się różnić od zaplanowanego o więcej niż 10%. W ogóle się przy tym nie interesuje jaka była naturalna zmienność owych różnic między budżetem zaplanowanym i rzeczywiście poniesionym. I jeżeli naturalna zmienność wynosiła np. $\pm 16\%$, to zalecone sprawdzenie nie ma żadnego sensu (przykład jest autentyczny). Rzecz w tym, że jeżeli w takich warunkach na przykład kierownik jednej inwestycji przekroczył zaplanowany budżet o więcej niż 10%, a mianowicie o 11%, to najprawdopodobniej ta konkretna inwestycja była tak samo typowa jak pozostałych dziewiętnaście i nie ma żadnego powodu, by ją akurat poddawać jakiejś specjalnej analizie. Inna sprawa, że naturalna zmienność rzędu 16% może być uznana za zbyt dużą. Działanie nad jej zmniejszeniem musi się wtedy zacząć od przyjrzenia się wszystkim inwestycjom, dokonania kategoryzacji pojawiających się problemów, by następnie przejść do przeanalizowania możliwości zmiany procesu inwestycyjnego (to jak istotne są różne problemy pomaga ocenić **analiza Pareta**). Uzasadniona może być też stratyfikacja procesu, np. rozróżnienie między inwestycjami ‘małymi’ i ‘dużymi’ (por. *Statystyka w kompleksowym zarządzaniu jakością*).

Przedstawiona na rysunku karta XmR pochodzi z książki B.L. Joinera, *Fourth Generation Management*, i dotyczy procentu niezrealizowanych na czas płatności w kolejnych 25 miesiącach. Gdyby nie granice kontrolne, procent niezrealizowanych płatności w miesiącu 25-tym mógłby z łatwością zostać potraktowany jako nietypowy i niepotrzebnie zaczęłoby się śledztwo co też szczególnie się w owym miesiącu zdarzyło.

Modyfikacje granic kontrolnych

- ◆ Zwykle początkowo ustala się *granice próbne*. Znajduje się wartości świadczące o nieuregulowaniu procesu (sygnały), wyznacza się i usuwa przyczyny specjalne oraz - - po usunięciu wartości sygnałów ze zbioru danych -- oblicza się powtórnie granice kontrolne.
- ◆ W sytuacji, gdy proces jest uregulowany (stabilny), granice kontrolne oraz linia centralna są przedłużane (tak by sięgnąć przyszłości procesu) i nowe punkty są nanoszone na kartę. Tak skonstruowane granice mogą pozostać niezmienione przez długi czas. Jeżeli proces zacznie dryfować lub podlegać innym zmianom, karta to zasygnalizuje; w odpowiedzi należy przywrócić proces do stanu uregulowania i ustalić na nowo granice kontrolne (jak to już opisano wyżej).
- ◆ Jeżeli proces poddany został istotnej zmianie, powinno się wyznaczyć nowe granice próbne. Zmiana ma z reguły na celu zmniejszenie zmienności własnej procesu, ale może też zmienić położenie linii centralnej i mogą pojawić się sygnały (proces po zmianie może i powinien mieć mniejszą zmienność własną, ale początkowo może okazać się nieuregulowanym).
- ◆ W procesie może zająć trwała zmiana, będąca skutkiem zadziałania przyczyny zewnętrznej, na którą nie mamy wpływu. Rozsądne jest wówczas obliczenie granic kontrolnych na nowo i następnie podjęcie pracy nad skompensowaniem owej niepożądananej zmiany.



Inne podstawowe karty kontrolne

Zaliczamy do nich odmiany kart już przedstawionych oraz karty przy ocenie alternatywnej. Spośród tych pierwszych wymienimy tu karty przy nierównych licznościach próbek (podgrup) oraz karty dla krótkich serii. Karty przy nierównych licznościach próbek są po prostu dostosowane do wymienionej sytuacji – gdy liczności kolejnych próbek, dla których oblicza się ich wartości średnie oraz odchylenia standardowe, są różne. Łatwo się zorientować, że karty \bar{X} -R oraz \bar{X} -S dają się znakomicie zastosować, gdy mamy do czynienia z produkcją wielkoseryjną. Co jednak czynić, gdy np. na tej samej obrabiarce produkuje się krótkie serie wyrobów podobnych, ale nieidentycznych (np. krótkie serie wałków o różnych średnicach), czyli gdy mamy do czynienia z krótkoseryjną produkcją wieloasortymentową. Granice kontrolne dla oryginalnych danych musiałyby wówczas być obliczane niezależnie dla różnych asortymentów, być może na podstawie zbyt niewielu danych. W podanej sytuacji należy zaproponować taką transformację danych oryginalnych, by dane przeskalowane były porównywalne, mimo że pochodzą z różnych asortymentów. Stosowna transformacja pozwala zbudować jedną kartę kontrolną dla wszystkich danych. Realizację takiego zadania ułatwia użycie kart dla krótkich serii.

Karty kontrolne przy ocenach alternatywnych dotyczą przypadku, gdy oryginalne dane są wynikiem dokonywania ocen alternatywnych ‘spełnia lub nie spełnia wymagań’ lub mierzenia liczby niezgodności (wad). Ocena alternatywna może np. mieć postać: płatność na czas lub nie, wysyłka na czas lub nie, średnica elementu w granicach tolerancji lub nie. W przypadku płatności i wysyłki ocenianą ‘partię’ stanowią wszystkie płatności i wysyłki z zadanego okresu, powiedzmy miesiąca. W przypadku oceniania średnicy elementu możemy badać liczbę elementów niezgodnych z wymaganiami w partiach o ustalonej liczności. Liczba niezgodności może np. dotyczyć liczby wad (jednego typu lub różnych typów) odlewu (partii odlewów) albo liczby reklamacji w zadanym przedziale czasu.

Karta Np (karta liczby jednostek niezgodnych) służy do badania liczby elementów nie spełniających wymagań. Na karcie wykreśla się liczbę jednostek (elementów) niezgodnych z wymaganiami w próbkach o stałej liczności. **Karta P** (karta frakcji jednostek niezgodnych) różni się od karty Np tylko tym, że zamiast liczby jednostek niezgodnych z wymaganiami wykreśla się na niej frakcję (procent) takich jednostek w próbce o zadanej liczności. W przypadku karty P liczności próbek mogą być różne. Jak wszystkie podstawowe karty kontrolne, obydwie karty buduje się podobnie jak karty omówione wcześniej, tyle że punktem wyjścia do obliczeń jest rozkład dwumianowy.

Gdy interesuje nas liczba niezgodności lub wad (na jednostkę, na partię, w zadanym przedziale czasu, na zadanej długości materiału itd.), posługujemy się **kartą C** (kartą liczby niezgodności). Mamy tu do czynienia z sytuacją jakościowo odmienną od tej, gdy stosuje się kartę Np lub P. Gdy interesuje nas liczba jednostek niezgodnych z wymaganiami w próbce o zadanej liczności, powiedzmy liczności n , wiemy, że jednostek niezgodnych nie może być więcej niż n . Gdy pytamy o liczbę niezgodności, nie umiemy podać górnego ograniczenia na wartość tej liczby. Probabilistyczną podstawę do konstrukcji karty C daje rozkład Poissona.



Karta C nie może być zastosowana, gdy licznosci próbek są różne. Stosujemy wówczas **kartę U** (kartę liczby niezgodności na jednostkę), na której wykreśla się stosunek liczby wad do licznosci próbki (zamiast o stosunku liczby wad do licznosci próbki, można by tu także mówić o stosunku liczby wad do długości badanego materiału, czasu badania itd.). Trzeba tu zaznaczyć, że granice kontrolne muszą tym razem być obliczane dla każdej próbki oddzielnie. W rezultacie granice te mają różne wartości dla różnych próbek.

Wybrane karty kontrolne do analizy problemów specjalnych

Nic nie przeszkadza, wręcz przeciwnie, warto zalecić by zastosowaniu dowolnej karty specjalistycznej towarzyszyło skonstruowanie także stosownej karty podstawowej. Różnice w otrzymanych obrazach mogą ułatwić wyciągnięcie najważniejszych wniosków. W przypadku trzech pierwszych kart, tzn. kart MA, EWMA i CUSUM, jawnie uwzględnia się, że obserwowane dane mogą nie być niezależne lecz być skorelowane, czyli że faktycznie mogą tworzyć szereg czasowy.

Karta średniej ruchomej (MA): Kartę tę warto stosować, gdy obserwowane średnie charakteryzują się trendem. Karta ta wygładza przebieg wykresu przez wykreślanie w kolejnych chwilach uśrednionej wartości kilku kolejnych średnich próbkowych (zamiast pojedynczej średniej, odpowiadającej próbce z danej chwili). Wygładzenie szybkiej zmienności losowej pozwala łatwiej zauważyć wolnozmienny trend obecny w danych. W obecności trendu, granica kontrolna na karcie MA zostaje często przekroczona prędy niż na zwykłej karcie Shewharta. Nic nie stoi na przeszkodzie stosowaniu tych kart, gdy dane są pojedyncze, czyli gdy licznosc próbek (podgrup) wynosi jeden (średnia „próbki” jest wówczas po prostu równa zaobserwowanej w danej chwili wartości).

Karta wykładniczo ważonych średnich ruchomych (EWMA): Jest to karta o podobnym działaniu do karty MA. Zamiast średniej z kilku średnich bierze się tu pod uwagę wszystkie wcześniejsze średnie z wykładniczo malejącymi wagami. Kolejny, i -ty punkt wykresu obliczany jest ze wzoru:

$$z_i = \lambda X_{\text{sr}} + (1 - \lambda) z_{i-1}$$

gdzie parametr λ przyjmuje ustaloną wartość między 0 a 1. Karta ta bywa czulsza od karty MA, zwłaszcza, gdy zmiany średniej są małe oraz gdy dane są pojedyncze.

Karta sum skumulowanych (CUSUM): Mówiąc ogólnie, na karcie wykreśla się (skumulowaną do chwili bieżącej) sumę odchyłek średnich próbkowych od wartości odniesienia, np. od wartości docelowej (nominalnej) analizowanego parametru lub od średniej ogólnej procesu. Jest to karta zaprojektowana tak, by wykryć trwałe przesunięcie średnich próbkowych. Karta ta wykrywa także trend, podobnie jak karta MA. Projektując kartę CUSUM, jej granice kontrolne ustala się tak, by uzyskać zadane prawdopodobieństwo fałszywego alarmu oraz zadane prawdopodobieństwo błędnej akceptacji przy zadanej wielkości wykrywalnego przesunięcia średniej. Karta jest czulsza na przesunięcia średniej niż inne karty, zwłaszcza gdy przesunięcie jest małe.

Karta X_{sr} dla danych o rozkładzie różnym od normalnego: Obliczenie wartości granic kontrolnych karty poprzedzone jest identyfikacją rozkładu (lub pewnych parametrów rozkładu), z jakiego pochodzą dane. Dla otrzymanego rozkładu oblicza się granice



kontrolne jako granice naturalnej zmienności własnej obserwowanych danych. Do otrzymanych wyników należy podchodzić z pewną ostrożnością, bowiem dokładne oszacowanie rozkładu danych – o ile zbiór danych nie jest bardzo liczny -- jest niemożliwe. Rezygnacja z oparcia się wyłącznie na karcie Shewharta jest uzasadniona wtedy tylko, gdy rozkład danych jest drastycznie różny od normalnego (jest wyraźnie skośny, wyostrzony lub spłaszczony). Zamiast konstruowania karty dla danych oryginalnych można także starać się dane poddać transformacji zmieniającej ich rozkład na normalny (lub bliski normalnemu).

Karta T^2 Hotellinga. Aż do tej chwili punktem zainteresowania był pojedynczy parametr procesu, który podlegał pomiarom (ich wyniki, lub średnie wyników w podgrupach, były nanoszone na kartę kontrolną). Nieraz badany proces powinien być charakteryzowany kilkoma (lub więcej) parametrami, które należy rozpatrywać łącznie. Innymi słowy, proces jest wówczas charakteryzowany wektorem parametrów. Klasyczną kartą kontrolną, która pozwala na zbadanie stabilności procesu opisywanego wektorem danych, jest karta T^2 Hotellinga. Karta ta może być stosowana wtedy tylko, gdy o wektorze danych można założyć, że jest normalny (karta pozostaje wiarygodna przy małych odstępstwach od normalności rozkładu tylko przy małym wymiarze wektora danych, powiedzmy 2 lub 3). Oczywiście szczególnie interesujący jest tu przypadek, gdy składowe wektora pomiarów są skorelowane.

Jeżeli pojedyncze parametry składające się na wektor danych są również interesujące, poza kartą Hotellinga, traktującą cały wektor łącznie, należy sporządzić także indywidualne karty \bar{X} -S lub \bar{X} -R dla tych parametrów. Rzecz w tym, że wektor pozostający w granicach stabilności procesu wielowymiarowego (czyli na karcie Hotellinga), może mieć składowe, które na kartach dla danych skalarnych są sygnałami. (Sygnałowi na karcie Hotellinga nie musi przy tym towarzyszyć sygnał na kartach dla składowych wektora pomiarów.)

Karty dla pomiarów wektorowych są nadal rozwijane w oparciu o metody statystycznej analizy wielowymiarowej. (Już 40 lat temu Jackson zauważył związek karty Hotellinga z **metodą składowych głównych**; w latach 80-tych wrócono do pracy nad nowymi kartami opartymi na metodzie składowych głównych, chcąc w ten sposób uzyskać wiarygodne karty kontrolne w przypadku, gdy wektory pomiarów mają wysoki wymiar.)

Analiza zdolności

Analiza zdolności procesu (lub maszyny) odpowiada na pytanie o to, na ile proces (maszyna) jest zdolny (jest zdolna) spełniać zadanie wyznaczone specyfikacjami (w dalszym ciągu mówić będziemy już tylko o analizie procesów). Procedury i terminologia analizy zdolności nie są jeszcze w pełni uzgodnione, ale z literatury i praktyki wynika już zasadniczo jednolity kształt działań na tym polu.

Analiza zdolności dzieli się na dwie części: analizę wstępną, dotyczącą procesu dopiero rozpoznawanego (nowego), oraz analizę właściwą, dotyczącą procesu pozostającego w stanie statystycznego uregulowania. Omówienie zaczynamy od analizy właściwej.



Aby przedstawić wskaźnik zdolności procesu, zwany też wskaźnikiem wydolności, zauważmy najpierw, że w przypadku losowania wielu liczb z rozkładu normalnego, 99,7% wylosowanych liczb leży w pasie $\pm 3\sigma$ wokół wartości średniej tego rozkładu. Przedział 6-sigmowy jest przedziałem zmienności własnej danych z rozkładu normalnego. Wskaźnik zdolności ma postać

$$C_p = (USL - LSL) / (6\sigma),$$

gdzie USL oznacza górną i LSL dolną granicę tolerancji, zaś σ jest odchyleniem standardowym zmienności własnej procesu (zwykle nieznanym i szacowanym tak jak się to czyni konstruując kartę \bar{X} -R lub \bar{X} -S). Wskaźnik ten mówi zatem jak się ma szerokość pasa tolerancji do szerokości przedziału zmienności własnej procesu. Wskaźnik zdolności mówi czy, i na ile, dany stabilny proces jest *potencjalnie* zdolny wykonywać wyspecyfikowane zadanie. Proces jest w oczywisty sposób ‘niezdolny’, jeśli $C_p < 1$ (dziś wymaga się zwykle, by wskaźnik C_p był równy przynajmniej 1,33). Jest to zdolność *potencjalna*, bowiem abstrahuje się tu od zagadnienia jak się ma ogólna średnia procesu do wartości nominalnej wielkości opisywanej przez proces. Jeżeli np. badanym procesem jest średnica toczonych wałków, nominalna wartość średnicy wynosi 30 mm, tolerancja $\pm 0,03$ mm, proces toczenia jest stabilny i $C_p = 1,67$, ale ogólna średnia procesu wynosi 30,05 mm, to proces jest wystarczająco *precyzyjny* i jest *potencjalnie* zdolny, ale jest *niedokładny* lub *niecelny*: nieomal zerowa jest szansa, że jakiś wałek znajdzie się w granicach tolerancji. Taki proces musi ulec wycentrowaniu: jego średnia musi być przesunięta do wartości nominalnej.

Podany wskaźnik dotyczy oczywiście sytuacji, gdy przedział tolerancji jest dwustronny. Łatwo podać odpowiedniki wskaźnika C_p , dostosowane do przypadku jednej tylko granicy tolerancji.

Jednocześnie o dokładności i precyzji procesu mówi wskaźnik wydajności procesu:

$$C_{pk} = C_p (1-k),$$

$$k = |\mu_0 - \mu| / [\min\{USL - \mu_0, \mu_0 - LSL\}],$$

gdzie μ_0 oznacza wartość docelową (nominalną) procesu, zaś μ średnią ogólną procesu. Współczynnik k jest miarą centralizacji procesu i jest równy zero, gdy wartość średnia jest równa wartości docelowej. Wskaźnik C_{pk} osiąga wartość największą, równą C_p , gdy $k=0$.

Z reguły, zadania poprawienia dokładności i precyzji procesu nie są zwykle jednakowo łatwe. Uzyskanie dobrej precyzji jest zazwyczaj trudniejsze i dlatego wprowadzono podane wyżej obydwa wskaźniki, C_p i C_{pk} (w omówieniu tym pomijamy kilka innych, podobnych wskaźników stosowanych w analizie zdolności).

W przeciwieństwie do kart kontrolnych Shewharta, wskaźniki zdolności mają ścisłą, podaną wyżej interpretację probabilistyczną. Przedział 6-sigmowy przestaje mieć sens, gdy rozkład analizowanych pomiarów jest inny niż normalny. W takim przypadku potrzebne jest określenie owego rozkładu i stosowne zmodyfikowanie wzorów na wskaźnik zdolności i wskaźnik wydajności procesu uregulowanego, tak by wielkość występująca



w mianowniku tych wzorów odpowiadała szerokości przedziału zmienności własnej procesu (w przedziale tym ma leżeć 99,7% danych).

Określenie rozkładu, z którego pochodzą wyniki pomiarów, jest jednym z zadań wstępnej analizy zdolności, mającej na celu możliwie wyczerpujące poznanie własności procesu. Są to badania o charakterze kompleksowym, mogące w zależności od uzyskiwanych wyników cząstkowych przebiegać na różne sposoby. Tu wymieniamy w telegraficznym skrócie tylko ich niektóre elementy. Badania przebiegają zgodnie z cyklem Deminga ‘zaplanuj-wykonaj-zbadaj-działaj’. Zaczynają się od wyboru do przyszłych pomiarów właściwych charakterystyk, wyboru aparatury pomiarowej i jej analizy ze względu na dokładność, powtarzalność i odtwarzalność. Po uporządkowanym zebraniu wyników pomiarów, dokonuje się ich wszechstronnej analizy. W tym, należy zbadać czy nie stwierdza się trendu lub przesunięć średniej (do czego można wykorzystać karty MA, EWMA, CUSUM). Jeżeli dane zbierane są w podgrupach i na podstawie kart nie można stwierdzić trendu i przesunięć średniej, należy zbadać zmienność w podgrupach i między grupami. Użycie karty kontrolnej Shewharta powinno pomóc w wykryciu zmienności wynikających z przyczyn specjalnych (zwłaszcza innych niż przesunięcia średniej lub trend). Gdy proces jest ustabilizowany, określony powinien zostać rozkład, z którego pochodzą dane. **Histogram** może wskazać na wyraźne odstępstwo od rozkładu normalnego (zawsze powinno się konstruować kilka histogramów z różnymi liczbami przedziałów i dopiero na tej podstawie formułować wnioski dotyczące spodziewanego typu rozkładu). Testowanie normalności rozkładu najlepiej jest oprzeć na testach skośności i kurtozy (wyostrzenia) oraz na **teście Shapiry-Wilka**. Bardzo skutecznym środkiem graficznego sprawdzenia czy rozkład jest normalny jest **wykres kwantyl-kwantyl oraz wykres prawdopodobieństwo-prawdopodobieństwo**. Często wykresy te pozwalają także stwierdzić typ ewentualnego odstępstwa od rozkładu normalnego. Znany ze swej dużej mocy test Shapiry-Wilka ujmuje za pomocą jednej liczby to co w sposób graficzny – i dzięki temu bogatszy -- pokazuje wykres kwantyl-kwantyl.

Jeżeli hipoteza o normalności rozkładu zostaje odrzucona, należy dopasować do danych inny rozkład i oszacować jego parametry. Odpowiadający otrzymanemu rozkładowi wykres kwantyl-kwantyl lub prawdopodobieństwo-prawdopodobieństwo jest znowu doskonałym sposobem sprawdzenia, czy dopasowanie jest trafne.

Dopasowywanie rozkładu do danych wymaga doświadczenia, zwłaszcza gdy zbiór danych nie jest bardzo liczny. W zasadzie powinno się unikać dopasowywania, gdy liczebność zbioru danych jest mniejsza niż 100.

W zestawie przykładów pakietu *STATISTICA* podana jest 100-elementowa próbka fikcyjnych danych, mających być średnicami pierścieni tłokowych o nominalnej wartości 74 mm i granicach specyfikacji $\pm 0,05$ mm. Próbka jest stabilna i podany wykres kwantyl-kwantyl potwierdza hipotezę normalności rozkładu. Proces jest dokładny, precyzyjny i dobrze wycentrowany: $C_p=1,649$, zaś $C_{pk}=1,648$. Ilustrują to poniższe wykresy:

