



EFEKTYWNE STATYSTYCZNE STEROWANIE PROCESAMI (SPC) Z WYKORZYSTANIEM PAKIETU STATISTICA

*prof. dr hab. Olgierd Hryniewicz, Wyższa Szkoła Informatyki Stosowanej i Zarządzania,
Instytut Badań Systemowych PAN*

Wprowadzenie

Statystyczne sterowanie procesami (SPC) jest najważniejszym zestawem narzędzi używanych w systemach zapewnienia jakości. Wynika to z oczywistego faktu, iż o sukcesie na drodze ku zapewnieniu najwyższej jakości oferowanych wyrobów i usług nie można myśleć, jeśli nie będzie wdrożony system kontroli, nadzoru i sterowania wszystkich procesów, których ostatecznym efektem jest oferowany wyrób lub usługa. Wśród rozmaitych metod SPC szczególną rolę odgrywają karty kontrolne procesów, wprowadzone przez W. Shewharta blisko osiemdziesiąt lat temu. O sukcesie kart kontrolnych Shewharta zadecydowały takie czynniki jak prostota wykorzystania oraz leżąca u ich podstaw czytelna idea statystyczna.

Analizując własności kart kontrolnych Shewharta statystycy zauważyli, że w wielu przypadkach praktycznych są one nieefektywne. W rezultacie zaproponowano szereg ich modyfikacji i rozszerzeń, a także zaproponowano inne typy kart kontrolnych. Opracowane przez statystyków nowe narzędzia statystyczne służące do statystycznego sterowania procesami nie są już tak proste jak oryginalne karty kontrolne Shewharta. Ich praktyczne wykorzystanie zależy bardzo często od wykorzystywanego oprogramowania komputerowego, służącego wspomaganie procesów SPC. Takie oprogramowanie może mieć postać specjalistycznych programów komputerowych dedykowanych dla potrzeb SPC lub też stanowić składnik dużych pakietów statystycznych ogólnego przeznaczenia. Na rynku polskim oprogramowanie specjalistyczne praktycznie nie występuje i dostępne jest, w zasadzie wyłącznie, w postaci modułów dużych pakietów statystycznych. Wśród tych pakietów na szczególne uznanie zasługuje pakiet *STATISTICA* firmy StatSoft, Inc. Można to uzasadnić tym, że zawarte w nim moduły wspomagające zadania sterowania jakością zawierają znacznie szerszą gamę użytecznych narzędzi statystycznych w porównaniu do pakietów konkurencyjnych. Przewaga ta jest szczególnie widoczna w przypadku polskich wersji tych pakietów, a w szczególności dotyczy to towarzyszącej tym pakietom dokumentacji. Z tego też powodu pakiet *STATISTICA* może być rekomendowany wszystkim osobom i firmom, którym zależy na wprowadzeniu efektywnych metod statystycznego sterowania procesami (SPC).

Zastosowanie pakietu *STATISTICA* do wdrożenia podstawowych metod SPC nie wymaga, poza ogólną wiedzą o metodach statystycznego sterowania jakością, specjalnego przygotowania. Do tego celu może wystarczyć dokumentacja pakietu, rozbudowany system Pomocy, a także pojawiające się popularne publikacje. Zawarta tam wiedza pozwala na efektywne wykorzystanie pakietu *STATISTICA* w wielu praktycznych przypadkach. W niniejszej pracy skoncentrujemy się jednak na tych metodach oferowanych w pakiecie *STATISTICA*, które zwiększają efektywność procesów SPC w wielu spotykanych w praktyce przypadkach. Ze względu na ograniczony rozmiar niniejszego



artykułu, ograniczymy się do rozpatrzenia przypadków wykrywania niewielkich rozregulowań procesów, a także na wykrywaniu rozregulowań opisywanych pewnymi charakterystycznymi wzorcami (konfiguracjami) wartości parametrów kontrolowanego procesu. Czytelników zainteresowanych głębszym potraktowaniem tego zagadnienia odsyłamy do książki O. Hryniewicz, „Nowoczesne metody statystycznego sterowania jakością” rozprawdanej przez Instytut Badań Systemowych PAN w Warszawie.

Wykrywanie niewielkich rozregulowań procesów za pomocą narzędzi oferowanych w pakiecie *STATISTICA*

Pakiet *STATISTICA* oferuje bogaty zestaw narzędzi statystycznych wspomagających procesy SPC zawartych w modułach

- ◆ Sterowanie jakością – karty kontrolne,
- ◆ Interakcyjne karty kontrolne,
- ◆ Analiza procesu.

Podstawowym narzędziem SPC jest karta kontrolna Shewharta dostępna w pierwszych dwu spośród wymienionych powyżej modułów. W przypadku najczęściej stosowanej w praktyce karty \bar{X} (czytaj: X-średnie) linie (granice) kontrolne wyznaczane są z ogólnej zależności

$$\bar{X}_g = \mu + k\sigma_{\bar{X}}$$

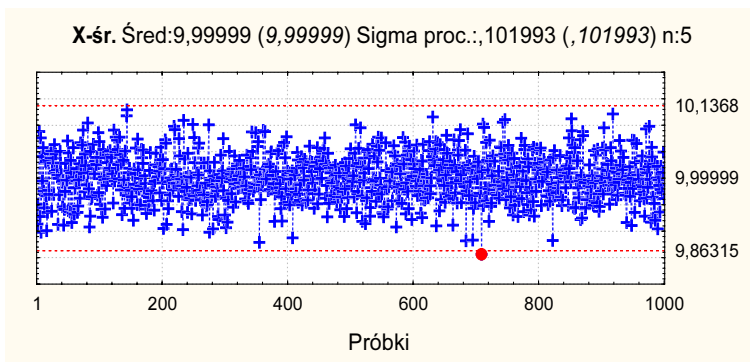
$$\bar{X}_d = \mu - k\sigma_{\bar{X}}$$

gdzie μ jest wartością średnią kontrolowanego procesu, a $\sigma_{\bar{X}}$ jest odchyleniem standardowym

wykreślanej na karcie statystyki \bar{X} - czyli wartości średniej z pobranej z kontrolowanego procesu próbki. W praktyce (wprowadzonej przez Shewharta) najczęściej przyjmuje się $k=3$ i mówimy wówczas o *trzyśmigowych* granicach kontrolnych. Metodologia wyznaczania linii kontrolnych karty \bar{X} opisana jest we wszystkich podręcznikach z dziedziny sterowania jakością oraz w normie międzynarodowej PN-ISO 8258. W pakiecie *STATISTICA* zastosowano ją również, przy czym w opcji domyślnej linie kontrolne są przeliczane po wprowadzeniu kolejnej porcji danych pomiarowych.

Cechą wyróżniającą kartę kontrolną Shewharta jest małe prawdopodobieństwo wystąpienia fałszywego alarmu, tzn. zasygnalizowania rozregulowania kontrolowanego procesu wtedy, gdy pozostaje on w stanie statystycznie uregulowanym. W przypadku dwustronnych granic tolerancji zdarzenie to zachodzi średnio raz na około 370 kontroli, zaś w przypadku jednostronnych granic tolerancji nawet jeszcze rzadziej – średnio jeden raz na około 740 kontroli (przykładowy wygląd karty kontrolnej dla uregulowanego procesu przedstawiono na rysunku 1). Z tego też powodu wystąpienie sygnału alarmowego prawie na pewno świadczy o rozregulowaniu kontrolowanego procesu. Niestety, niskie prawdopodobieństwo wystąpienia fałszywych alarmów okupione jest bardzo małą skutecznością kontroli w przypadku występowania stosunkowo niewielkich rozregulowań procesu. Przyjmuje się, że karta kontrolna Shewharta jest efektywna, gdy rezultatem rozregulowania jest zmiana wartości średniej kontrolowanego procesu o wartość nie mniejszą niż $3\sigma/\sqrt{n}$, gdzie σ jest odchyleniem standardowym mierzonej właściwości procesu. Przy takim właśnie

przesunięciu wartości średniej prawdopodobieństwo jego wykrycia wynosi 0,5, a więc rozregulowanie zostanie wykryte średnio w drugiej kontroli procesu.



Rys. 1. Karta kontrolna X-średnie. Proces uregulowany

W celu zilustrowania opisanego powyżej zjawiska rozpatrzmy przykład procesu odznaczającego się współczynnikiem zdolności (wydolności) $C_p=1,5$. Proces o takim współczynniku zdolności odznacza się bardzo wysoką jakością. Można wyliczyć, że w przypadku procesu dobrze scentrowanego, tzn. o wartości średniej znajdującej się pośrodku przedziału tolerancji, frakcja wyrobów niezgodnych wynosi 0,0007% (czyli 7 ppm). Jest to więc jakość bliska idealnej. Przyjmijmy teraz, że w wyniku rozregulowania procesu nastąpiło przesunięcie wartości średniej o wielkość równą 1σ , co odpowiada wzrostowi frakcji wyrobów niezgodnych do wartości 0,0233% (czyli 233 ppm). Oznacza to ponad trzydziestokrotne pogorszenie jakości procesu. W poniższej tabeli podane zostały przybliżone wartości średniej liczby kontroli (ARL) niezbędnych do wykrycia tego rozregulowania przy pomocy karty \bar{X} , dla próbki o liczności n jednostek.

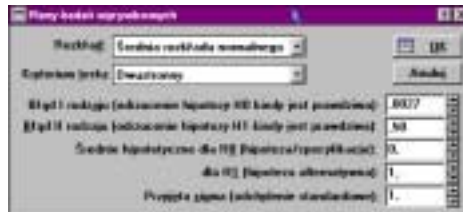
n	ARL
1	43,9
3	8,3
5	4,5
7	2,8
10	1,8

Jak łatwo zauważyć, wybór odpowiedniej liczności próbki decyduje o efektywności wykorzystania karty kontrolnej. Wyboru tego możemy dokonać wykorzystując moduł **Analiza procesu** pakietu *STATISTICA*. W tym celu w panelu początkowym modułu wybieramy opcję *Plany badań wyrzykowych średnich, proporcji, częstości Poissona*. Po wyborze tej opcji wprowadzamy następujące dane:

- ◆ Rozkład: Średnia rozkładu normalnego
- ◆ Kryterium testu: dwustronny (przy dwustronnych granicach tolerancji) lub jednostronny (przy jednostronnych granicach tolerancji)
- ◆ Błąd I rodzaju: 0,00270 (przy dwustronnych granicach tolerancji) lub 0,00135 (przy jednostronnych granicach tolerancji)



- ◆ Błąd II rodzaju: liczba nie większa niż 0,5, odpowiadająca prawdopodobieństwu nie wykrycia rozregulowania procesu
- ◆ Średnie hipotetyczne dla H0: wartość średnia procesu w stanie uregulowanym
- ◆ Średnie hipotetyczne dla H1: wartość średnia procesu po wystąpieniu rozregulowania, które chcemy wykryć
- ◆ Przyjęta sigma: odchylenie standardowe kontrolowanego procesu.



Rys. 2. Przykładowe okno wprowadzania danych w procedurze wyznaczania liczności próbki dla karty X-średnie

W przypadku rozpatrywanego przez nas powyżej przykładowego procesu okno wprowadzenia powyższych danych przedstawiono na rysunku 2. Wynik analizy przedstawiony jest na rysunku 3. Jak widać, niezbędna liczność próbki przy prawdopodobieństwie błędu II rodzaju równym 0,5 wynosi $n=9$ jednostek, zaś przy prawdopodobieństwie błędu II rodzaju równym 0,1 wynosi $n=19$ jednostek. Tak więc zalecana w wielu podręcznikach jakości próbka o liczności $n=5$ jednostek jest zdecydowanie zbyt mało liczna by szybko wykryć to rozregulowanie, gdyż wykrycie następuje po, średnio, 4,5 kontrolach.

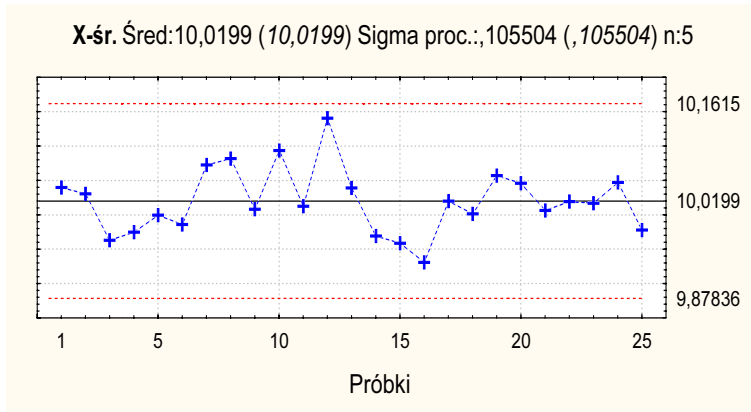


Rys. 3. Wynik analizy w procedurze wyznaczania liczności próbki dla karty X-średnie

W wielu spotykanych w praktyce przypadkach nie jesteśmy w stanie dysponować odpowiednio dużą licznością próbki i wobec tego musimy się liczyć z koniecznością odczekania pewnego odcinka czasu (o zmieniającej się losowo długości) do momentu wykrycia rozregulowania. Jeżeli jednak będziemy korzystać tylko z domyślnej opcji, zgodnie z którą parametry karty kontrolnej przeliczane są na nowo po pomiarze kolejnej próbki, możemy nigdy nie doczekać się takiego sygnału. W domyślnej opcji do oceny parametrów procesu (wartość średnia, odchylenie standardowe) niezbędnych do wykreślenia karty kontrolnej program korzysta ze *wszystkich* dostarczonych mu danych, w tym również z danych uzyskanych po rozregulowaniu procesu. Jeżeli rozregulowanie nie zostanie szybko wykryte, co w przypadku małych rozregulowań jest regułą,



może się zdarzyć, że parametry procesu będą wyestymowane z uwzględnieniem wielu danych pochodzących z procesu rozregulowanego. W rezultacie może nastąpić przesunięcie linii kontrolnych w kierunku rozregulowania, co w konsekwencji może doprowadzić do jego niewykrycia. W celu uniknięcia tego niebezpieczeństwa należy postępować zgodnie z procedurą podaną w normie PN-ISO 8258. Po wykreśleniu na karcie rezultatów kontroli 20 do 30 próbek pochodzących z procesu będącego w stanie uregulowanym należy zapisać wyestymowaną wartość średnią oraz wyestymowane odchylenie standardowe (patrz rys. 4).

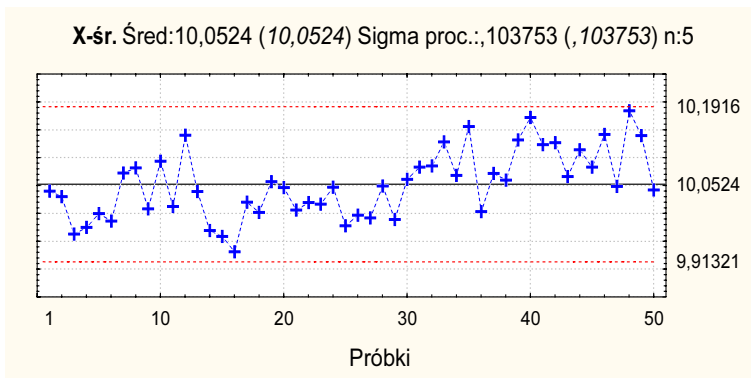


Rys. 4. Karta kontrolna X-średnie. Proces uregulowany. Przebieg początkowy – 25 próbek

W przypadku kolejnych próbek po wykreśleniu w sposób automatyczny karty kontrolnej w oknie ustawiania parametrów karty zamiast opcji

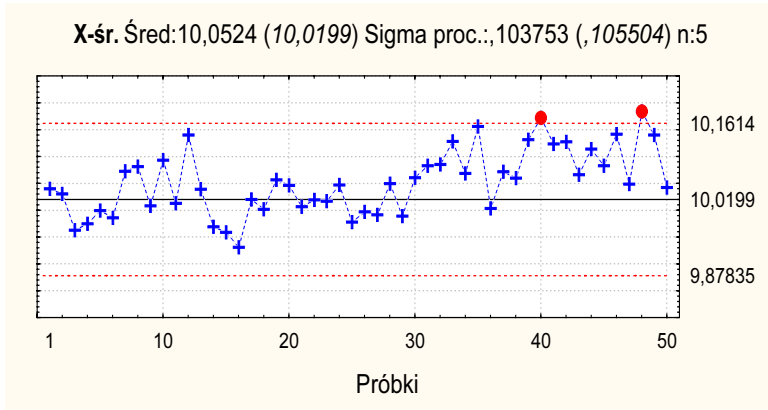
- ◆ L.centralna: średnia procesu
- ◆ sigma: obliczona

należy wpisać zapisane uprzednio wartości. W takim przypadku mamy gwarancję, że karta kontrolna będzie wyznaczona w oparciu o wartości parametrów wyznaczonych w okresie gdy badany proces był uregulowany. Na rysunku 5 (karta kontrolna X-średnie) przedstawiono proces, który uległ stosunkowo nieznacznemu rozregulowaniu. Przy automatycznym przeliczaniu parametrów karty rozregulowanie to nie zostało wykryte.



Rys. 5. Proces uregulowany do 30 próbek. Od 31 próbki przesunięcie wartości średniej procesu o 1 sigma. Karta po 50 próbkach – parametry karty automatycznie przeliczane

Jeżeli ustalimy wartości parametrów karty na podstawie obserwacji procesu, który jest na pewno uregulowany, to takie rozregulowanie będzie wcześniej wykryte. Przedstawiono to na rysunku 6 (karta kontrolna X-średnie).



Rys. 6. Proces uregulowany do 30 próbek. Od 31 próbki przesunięcie wartości średniej procesu o 1 sigma. Karta po 50 próbkach – parametry karty ustalone po 25 próbkach

Innym narzędziem statystycznym pozwalającym na szybsze wykrycie niewielkich rozregulowań kontrolowanego procesu jest karta sum skumulowanych. W pakiecie *STATISTICA* można z niej skorzystać przywołując moduł **Stewowanie jakością - karty kontrolne** i wybierając opcję *Karta kontrolna CUSUM przy ocenie liczbowej*. Stosując kartę CUSUM musimy jednak pamiętać, że jest ona mniej efektywna od karty Shewharta w przypadku wykrywania większych rozregulowań. Również dostępne w pakiecie *STATISTICA* karty ruchomej średniej oraz karty wykładniczo ważonej ruchomej średniej odznaczają się powyższą własnością.

Wykrywanie rozregulowań przejawiających się w postaci konfiguracji punktów na karcie kontrolnej

Najprostszy, i najczęściej spotykany, sposób rozregulowania się procesu przejawia się w postaci skokowego przesunięcia wartości parametru procesu (wartości średniej lub odchylenia standardowego). Spotyka się również inne postacie rozregulowań, które są trudne do rozpoznania przy pomocy zwykłej karty kontrolnej Shewharta. Klasycznym przykładem jest tu stopniowe rozregulowywanie się procesu powodujące ciągłą zmianę w czasie jego wartości średniej. Praktycy mówią w takim przypadku o „płynięciu” procesu, a statystycy nazywają to występowaniem trendu opisującego kolejne wartości średnie. W przypadku gdy trend ten nie jest zbyt wyraźny, sygnał alarmowy na zwykłej karcie Shewharta może pojawić się dopiero po upływie pewnego czasu. Jeżeli do wykreślenia karty kontrolnej będziemy wykorzystywać pakiet *STATISTICA* z włączoną domyślną opcją automatycznego przeliczania parametrów karty, to czas ten może być niedopuszczalnie długi. W takim bowiem przypadku, parametry karty kontrolnej będą „adaptowały się” do zmieniających się w czasie parametrów procesu. Podobny efekt będzie również występował w przypadku takich potencjalnie niekorzystnych zjawisk jak występowanie cyklicznych zmian w procesie lub występowanie niejednorodności procesu (tzw. stratyfikacja). Konieczne jest wykorzystanie specjalnego narzędzia jakim jest analiza sekwencyjnych sygnałów alarmowych (wzorców przebiegu). Pakiet *STATISTICA* umożliwia proste przeprowadzanie takich analiz.



W literaturze światowej dużą popularnością cieszy się zestaw sygnałów sekwencyjnych zaproponowany po raz pierwszy w kompanii Western Electric i obecnie szeroko stosowany w praktyce przemysłowej. W celu wykorzystania tych sygnałów dzieli się obszar pomiędzy trzysigmowymi granicami kontrolnymi na 6 jednakowych stref. Decyzja podejmowana jest na podstawie analizy konfiguracji wyników sekwencji pomiarów z próbek. W metodzie Western Electric zaproponowano 8 rodzajów analizy - zwanych testami konfiguracji - pozwalających wykryć tzw. wyznaczalne przyczyny rozregulowań procesu. Testy te opisane są w również w normie PN-ISO 8258.

Test 1. Jest to omawiany powyżej normalny sygnał alarmowy (punkt poza zewnętrznymi granicami kontrolnymi).

Test 2. Dziewięć kolejnych punktów po tej samej stronie linii centralnej.

Test 3. Sześć kolejnych punktów o wartościach rosnących lub malejących.

Test 4. Czternaście kolejnych punktów o wartościach na przemian rosnących i malejących.

Test 5. Dwa z trzech kolejnych punktów w tej samej strefie A.

Test 6. Cztery z pięciu kolejnych punktów znajdują się w strefach A i B leżących po tej samej stronie linii centralnej.

Test 7. Piętnaście kolejnych punktów w strefie C po obu stronach linii centralnej.

Test 8. Osiem kolejnych punktów w strefach A i B po obu stronach linii centralnej.

W pakiecie *STATISTICA* uruchamiamy analizę sekwencyjnych sygnałów alarmowych klikając przycisk *Testy wzorca przebiegu*, znajdujący się na dole okna ustawień parametrów karty kontrolnej. Pojawia się wówczas okno (patrz rys.7), w którym możemy ustawić parametry poszczególnych testów.



Rys. 7. Okno do wyboru testów wzorca przebiegu

Domyślnie przyjmowane są parametry zgodne z normą PN-ISO 8258, jednakże możliwe jest samodzielne ustawienie wartości tych parametrów. Po kliknięciu *OK* program dokonuje analizy wskazując na te miejsca procesu, dla których występują sygnały alarmowe. Wyniki przykładowej analizy podane są na rysunku 8.



Testy	α	α
1	0.087	0.087
1,2,3,4	0.210	0.210
1,2,3,4,5,6	0.272	0.272
1,2,3,4,5,6,7,8	0.297	0.297

Rys. 8. Wyniki testu wzorca przebiegów

Stosując analizę wzorców przebiegu należy zachować pewną ostrożność. Po pierwsze nie zaleca się zmieniać parametrów testów. Zostały one dobrane w taki sposób, by w przypadku przeprowadzenia pojedynczego testu prawdopodobieństwo wystąpienia fałszywego alarmu było wystarczająco małe. Po drugie należy pamiętać, że w przypadku równoczesnego stosowania wielu testów prawdopodobieństwo wystąpienia fałszywego alarmu znacznie wzrasta. W poniższej tabeli przedstawiono prawdopodobieństwa α wystąpienia takiej sytuacji dla 30 kolejnych próbek pobranych z kontrolowanego procesu, gdy stosowane są różne kombinacje testów wzorca przebiegu.

Testy	1	1,2,3,4	1,2,3,4,5,6	1,2,3,4,5,6,7,8
α	0.087	0.210	0.272	0.297

Jak widać, stosowanie jednocześnie wszystkich testów prowadzi do dosyć częstego występowania fałszywych alarmów. W związku z tym, decyzja o ingerencji w kontrolowany proces umotywowana wyłącznie negatywnym wynikiem testu wzorca przebiegu powinna być podejmowana z dużą ostrożnością.

Zakończenie

Pakiet *STATISTICA* umożliwia efektywne statystyczne sterowanie procesami z wykorzystaniem różnorodnych narzędzi statystycznych. Możliwe jest wykorzystanie rzadko stosowanych w praktyce metod, których stosowanie znacznie zwiększa efektywność sterowania procesem. Należy jednak pamiętać o omówionych w niniejszej pracy konsekwencjach stosowania tych metod w praktyce.