

Tadeusz SAŁACIŃSKI<sup>1</sup>

## ANALIZA ZDOLNOŚCI NARZĘDZI I SYSTEMÓW POMIAROWYCH

W artykule zdefiniowane zostały wskaźniki zdolności narzędzi i systemów pomiarowych stosowanych w procesach wytwórczych maszyn. W ocenie autora wskaźniki takie są zbyt rzadko stosowane w praktyce. Zaproponowano metodykę analizy zdolności na bazie trzech procedur i wskaźników  $C_g$  oraz  $C_{gk}$ . Podano praktyczne przykłady obliczeń i interpretacji wyników.

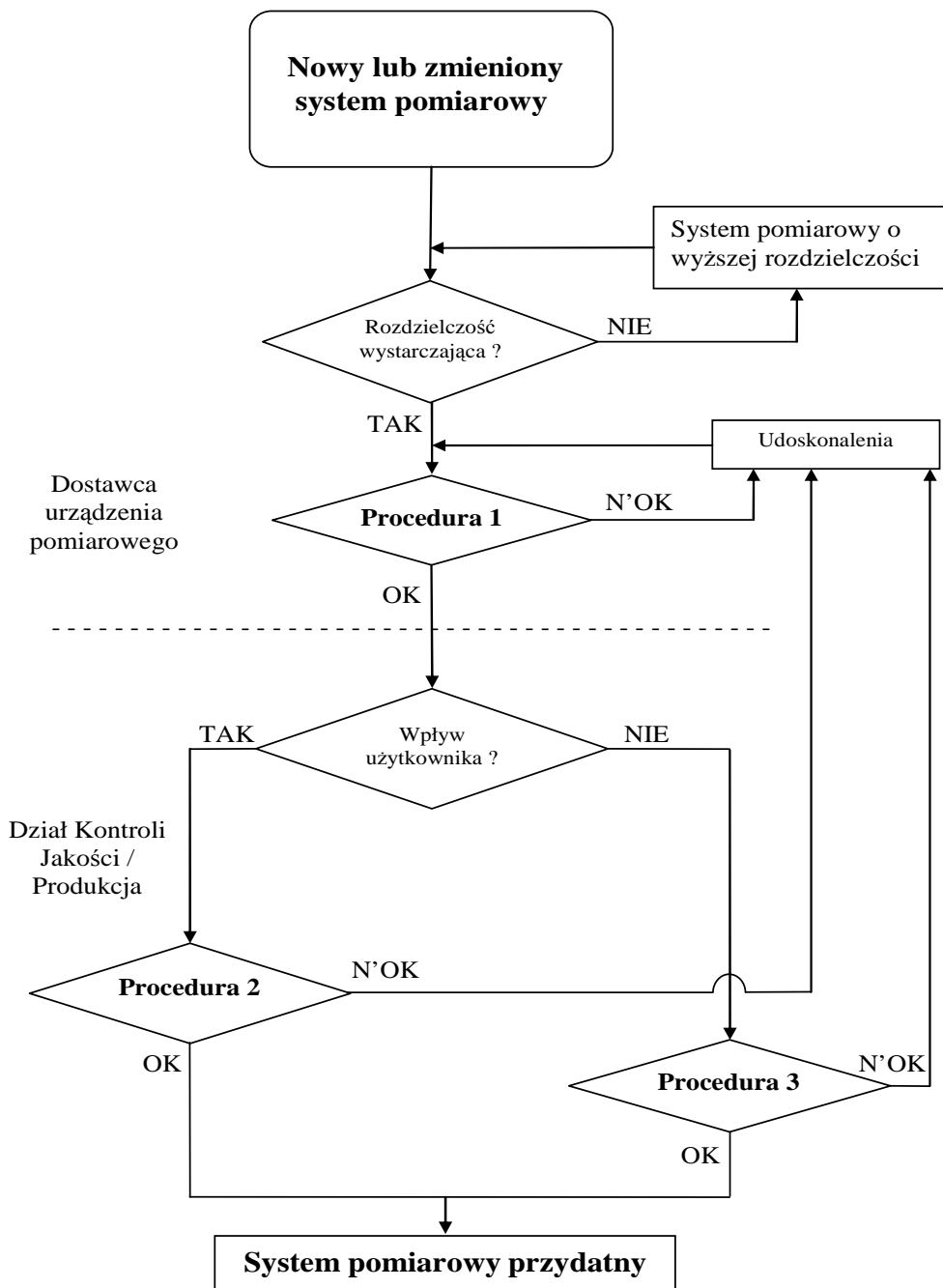
### 1. WPROWADZENIE

Analiza zdolności systemów pomiarowych (ang. *MSA – Measurement System Analysis*) realizowana jest na bazie trzech procedur [1-2],[4-6]:

- *Procedura 1.* Niepewność pomiarów  $u_c$  oraz wskaźniki zdolności  $C_g$ ,  $C_{gk}$  (zdefiniowane dalej),
- *Procedura 2.* Powtarzalność, odtwarzalność i rozrzut całkowity (metoda *R&R*) z uwzględnieniem wpływu użytkownika np. w sytuacji, gdy pomiary wykonywane są przez kilku operatorów,
- *Procedura 3.* Powtarzalność i rozrzut całkowity bez uwzględnienia wpływu użytkownika. Wpływu użytkownika/operatora wykonującego pomiar nie uwzględnia się w pomiarach zautomatyzowanych, bądź w takich, gdzie jego wpływ ograniczony jest do nieznaczącego minimum.

Procedura 1 stosowana jest w firmach produkujących narzędzia, urządzenia bądź systemy pomiarowe w celu wykazania ich przydatności dla potencjalnego klienta. Stosuje się ją również do nadzorowania liniowości i stabilności systemu w trakcie procesów produkcyjnych u klienta. Procedury 2 i 3 wykorzystuje się w analizie systemu pomiarowego zainstalowanego u użytkownika bezpośrednio w procesach produkcji lub w działach kontroli jakości. Należy to czynić systematycznie – częściej tuż po instalacji, a następnie w dłuższych odstępach czasu uzasadnionych ekonomicznie. Kontrola stabilności musi być bezwzględnie przeprowadzona po każdej zmianie w systemie pomiarowym. Schemat oceny przydatności systemu pomiarowego na bazie ww. trzech procedur przedstawia rys. 1.

<sup>1</sup> Zakład Automatykacji, Obrabiarek i Obróbki Skrawaniem, Wydział Inżynierii Produkcji Politechniki Warszawskiej

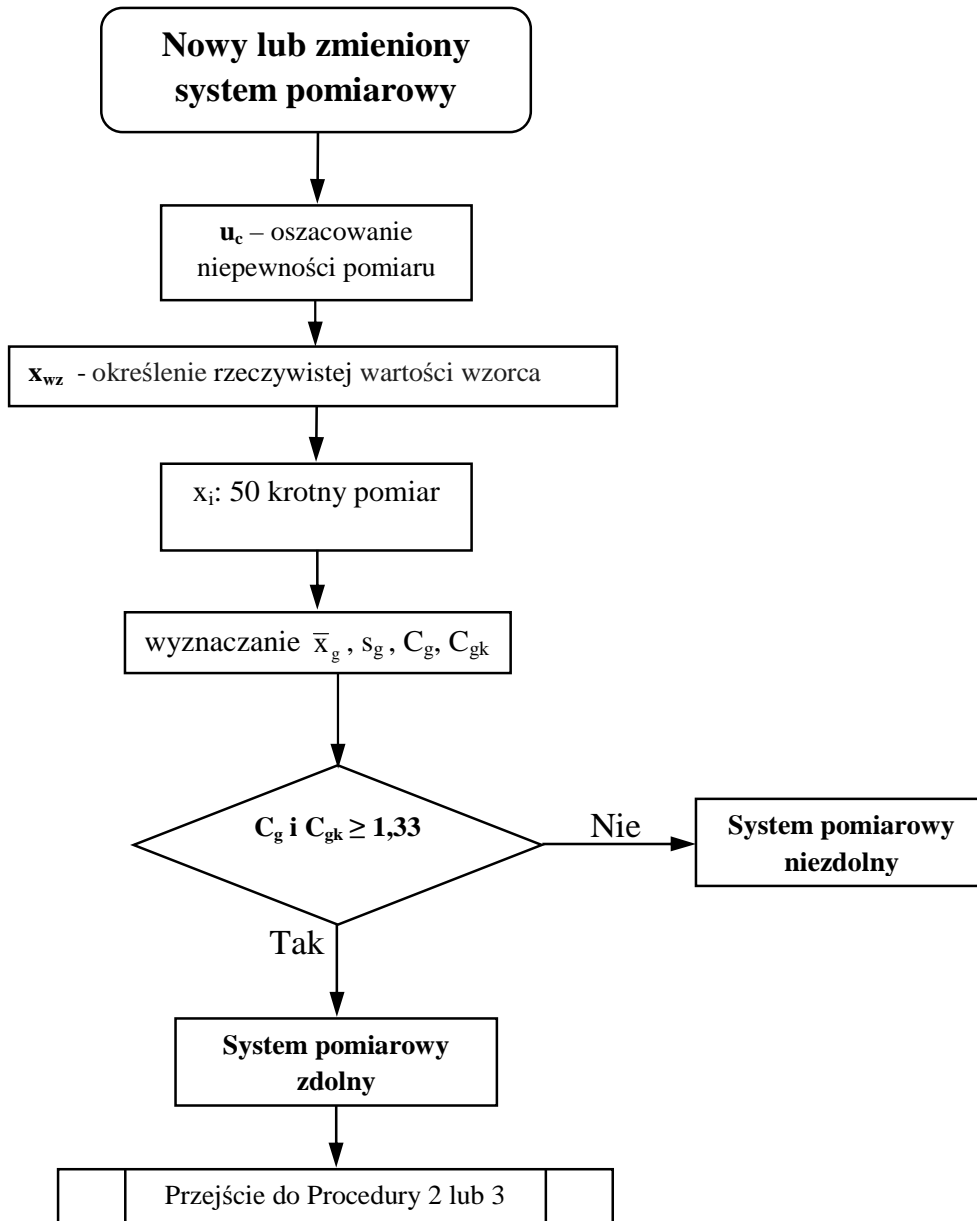


Rys. 1. Schemat oceny przydatności systemu pomiarowego (MSA) (opracowanie własne na podstawie [2])  
 Fig. 1. The scheme of measurement system analysis (MSA) (own report based on [2])

## 2. SCHEMAT I INTERPRETACJA PROCEDURY 1

*Procedura 1* (rys. 2) stosowana jest przez producenta nowego urządzenia/systemu pomiarowego lub w docelowym miejscu jego użytkowania, u klienta, jako potwierdzenie danych producenta. Jej celem jest wstępne określenie zdolności systemu przed użyciem go

w trakcie rutynowej produkcji, która wymaga uwzględnienia rzeczywistych warunków pomiaru zależnych od otoczenia, rozrzutu składników systemu, liczby operatorów itd.



Rys. 2. Schemat blokowy Procedury 1 (opracowanie własne na podstawie [2])

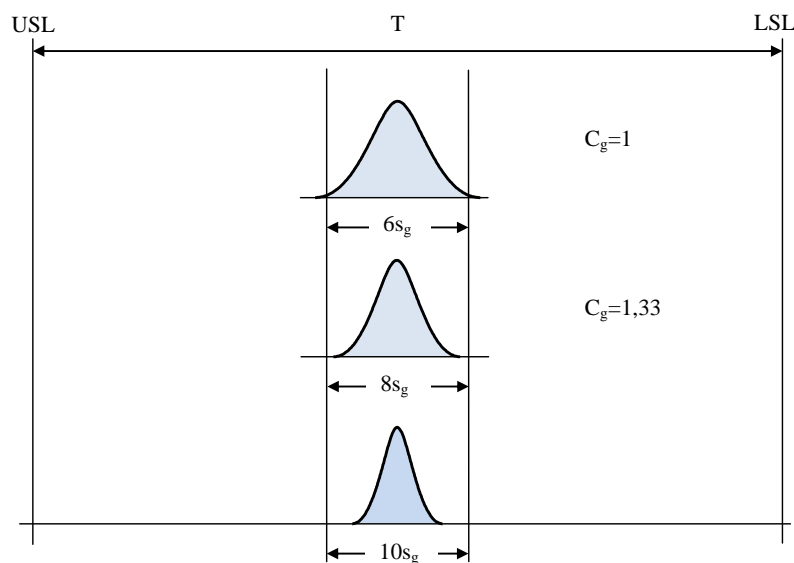
Fig. 2. The block diagram of Procedure 1 (own report based on [2])

Realizacja *Procedury 1* polega na oszacowaniu niepewności pomiarowej  $u_c$  oraz wykonaniu serii co najmniej 50 pomiarów na wzorcu, którego wymiar  $x_{wz}$  jest najczęściej położony w połowie przedziału tolerancji badanej cechy. Na bazie otrzymanych pomiarów wyznacza się wartości wskaźników zdolności  $C_g$ ,  $C_{gk}$ . Wskaźniki zdolności systemu (narzędzia pomiarowego)  $C_g$ ,  $C_{gk}$  są odpowiednikami wskaźników zdolności procesu wytwórczego  $C_p$ ,  $C_{pk}$  i odnoszone są do  $0,2T=0,2(USL-LSL)$ :

- $C_g = \frac{0,2 \cdot T}{6 \cdot s_g} = \frac{0,2 \cdot (USL - LSL)}{6 \cdot s_g}$  - wskaźnik rozrzutu
- $C_{gk} = \frac{0,1 \cdot T - |\bar{x}_g - x_{wz}|}{3 \cdot s_g} = \frac{0,1 \cdot (USL - LSL) - |\bar{x}_g - x_{wz}|}{3 \cdot s_g}$  - wskaźnik wycentrowania

gdzie: T - tolerancja cechy (wymiaru), USL (GGS) - górny wymiar graniczny, LSL (DGS) - dolny wymiar graniczny,  $s_g$  - odchylenie standardowe wyników pomiaru wzorca,  $\bar{x}_g$  - wartość średnia wyników pomiaru wzorca  $x_{wz}$ .

Interpretację wskaźników zdolności systemu pomiarowego pokazano na rys. 3. Dla zdolnego systemu  $C_g, C_{gk} \geq 1,33$ .



Rys. 3. Interpretacja wskaźnika zdolności systemu pomiarowego  $c_g$  [2]  
Fig. 3. The interpretation of  $c_g$  gauge capability index [2]

Kolejne kroki obliczeń w Procedurze 1 zestawiono poniżej:

1.  $u_c$  - analiza (oszacowanie) niepewności pomiaru,
2.  $x_{wz}$  - założenie wartości wzorca odpowiadającej wartości docelowej WD (najczęściej jest to środek przedziału tolerancji, ale nie zawsze),
3.  $\bar{x}_g = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i$  - średnia serii pomiarów wzorca ( $n \geq 50$ ),
4.  $s_g = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^k (x_i - \bar{x}_g)^2}$  - odchylenie standardowe serii pomiarów wzorca,
5.  $C_g = \frac{0,2 \cdot T}{6 \cdot s_g} = \frac{0,2 \cdot (USL - LSL)}{6 \cdot s_g}$  - wskaźnik zdolności związany z rozrzutem,
6.  $C_{gk} = \frac{0,1 \cdot T - |\bar{x}_g - x_{wz}|}{3 \cdot s_g} = \frac{0,1 \cdot (USL - LSL) - |\bar{x}_g - x_{wz}|}{3 \cdot s_g}$  - wskaźnik zdolności związany z wycentrowaniem.

### 3. SCHEMAT I INTERPRETACJA PROCEDURY 2

Procedura 2 (rys. 4) dotyczy oceny systemu pomiarowego, poprzez analizę powtarzalności, odtwarzalności i rozrzutu całkowitego (metoda *R&R*), z uwzględnieniem wpływu użytkownika (np. w sytuacji, gdy pomiary wykonywane są przez kilku operatorów). Realizowana jest po wykonaniu Procedury 1, która powinna wykazać zdolność systemu pomiarowego, tzn. wymaganą niepewność pomiarów  $u_c$  oraz odpowiednie wartości wskaźników zdolności  $C_g$ ,  $C_{gk}$ . Celem stosowania Procedury 2 jest uwzględnienie dalszych wpływów na rozrzut systemu (nowego lub używanego zmienionego albo użytego do nowych zadań), który zainstalowany został w dziale kontroli (pomiarów) bądź bezpośrednio w dziale wytwórczym. Pomiary wykonuje się na wyrobach seryjnych (na ogół dziesięć), tak dobranych, aby pokrywały w miarę równomiernie cały zakres rozrzutu procesu. Realizowane są na stanowisku produkcyjnym przez z reguły trzech różnych operatorów urządzeń, niezależnie od siebie. Każdy pracownik powtarza pomiary dwu lub trzykrotnie. Pracownicy nie znają wyników swoich poprzedników. Zbiorcze wyniki pomiarów zestawia się w tabeli (tabl. 2).

Na jej podstawie wyznaczony zostaje wskaźnik tzw. „rozrzut całkowity R&R” (tab. 1). Umożliwia to podjęcie decyzji o tym czy system pomiarowy [2]:

- nadaje się do wykorzystania,
- musi zostać udoskonalony (daje się użyć warunkowo) albo
- jest nie do zaakceptowania (konieczne są środki naprawcze).

Tabela 1. Zdolność systemu pomiarowego w zależności od wartości parametru *R&R*  
Table 1. The measurement system capability presented as a function of R&R parameter

Ocena zdolności systemu	Rozrzut całkowity systemu pomiarowego	
	Używany system pomiarowy	Nowy system pomiarowy
Zdolny	$\%R\&R < 20\%$	$\%R\&R < 10\%$
Zdolny warunkowo	$20\% \leq \%R\&R \leq 30\%$	$10\% \leq \%R\&R \leq 30\%$
Niezdolny	$\%R\&R > 30\%$	$\%R\&R > 30\%$

Uwaga: Procedura 3 jest uproszczeniem Procedury 2 i dotyczy pomiarów wykonywanych bez udziału operatora (pomiary zautomatyzowane). Wykonuje się wówczas 2 serie pomiarów 25 wyrobów uzyskanych z produkcji i oblicza jedynie powtarzalność. Ze względu na rozmiar artykułu nie zostaną podane jej szczegóły, które można znaleźć w [5].

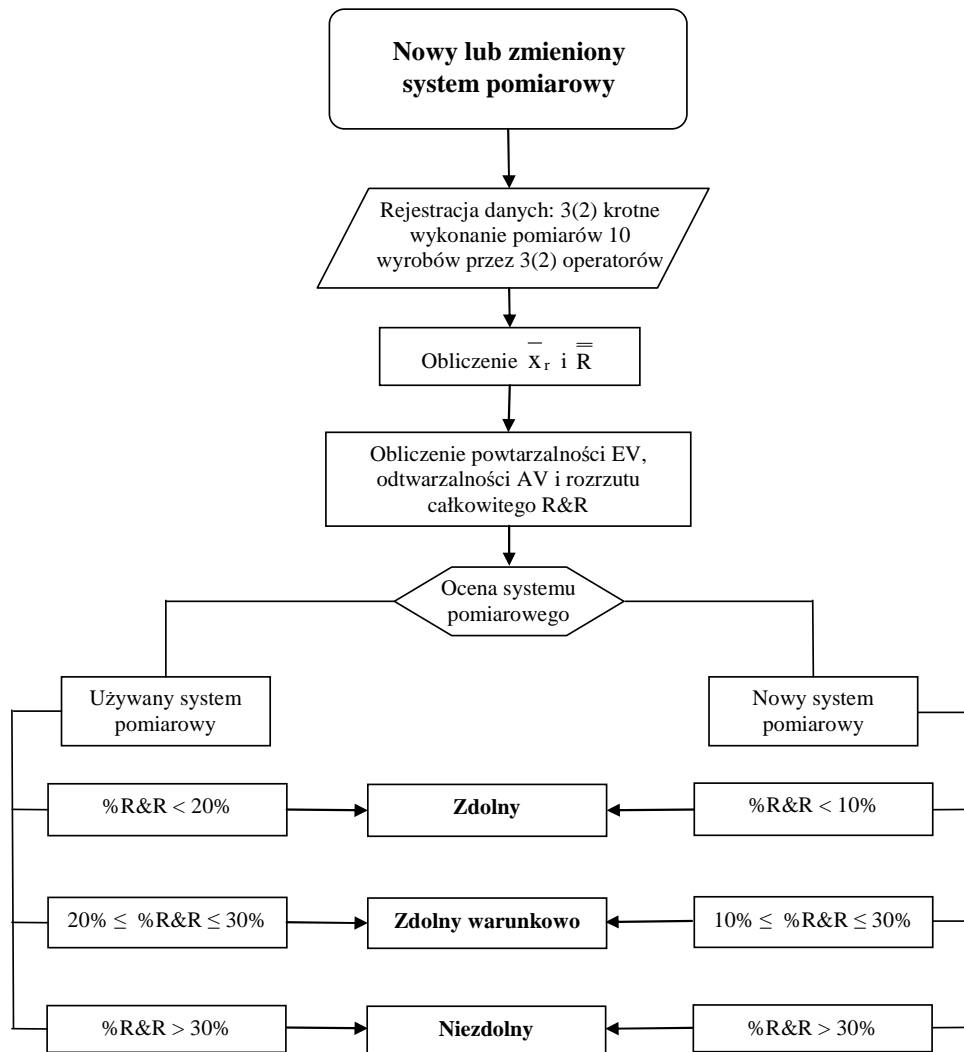
Kolejne kroki obliczeń w Procedurze 2 zestawiono poniżej:

1.  $\bar{R}_A = \frac{\sum_{i=1}^{10} R_{Ai}}{10}$ ;  $\bar{R}_B = \frac{\sum_{i=1}^{10} R_{Bi}}{10}$ ;  $\bar{R}_C = \frac{\sum_{i=1}^{10} R_{Ci}}{10}$  - średnie rozstępów wyników pomiarów trzech operatorów A, B, C,
2.  $\bar{\bar{R}} = \frac{\bar{R}_A + \bar{R}_B + \bar{R}_C}{3}$  - średnia średnich rozstępów,
3.  $\bar{x}_A = \frac{\sum_{i=1}^{30} x_{Ai}}{30}$ ;  $\bar{x}_B = \frac{\sum_{i=1}^{30} x_{Bi}}{30}$ ;  $\bar{x}_C = \frac{\sum_{i=1}^{30} x_{Ci}}{30}$  - średnie wyników pomiarów trzech operatorów A, B, C,
4.  $\bar{x}_r = \bar{x}_{max} - \bar{x}_{min}$  - różnica największej i najmniejszej wartości średniej,
5.  $EV = k_1 \bar{\bar{R}}$ ; EV (Equipment Variation) – powtarzalność,  
 $k_1 = 4,56$  dla 2 serii pomiarów;  
 $k_1 = 3,05$  dla 3 serii pomiarów, na poziomie ufności 99%,
6.  $AV = k_2 \bar{x}_r$ ; AV (Appraiser Variation) – odtwarzalność,  
 $k_2 = 3,65$  dla 2 operatorów;  
 $k_2 = 2,70$  dla 3 operatorów na poziomie ufności 99%,
7.  $R \& R = \sqrt{EV^2 + AV^2}$  - powtarzalność i odtwarzalność,
8.  $\%EV = 100[EV^2 / (R \% R \cdot T)]$  - powtarzalność procentowa w odniesieniu do tolerancji,
9.  $\%AV = 100[AV^2 / (R \% R \cdot T)]$  - odtwarzalność procentowa w odniesieniu do tolerancji,
10.  $\%R\&R = \%EV + \%AV$  - procentowy wskaźnik powtarzalności i odtwarzalności.

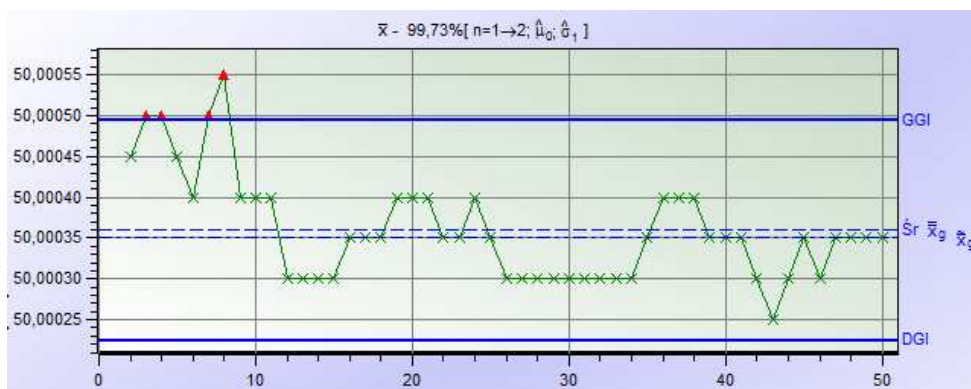
**Przykład 1.** Jeden operator dokonujący pomiaru wzorca. Dane specyfikacji: LSL=49,995, USL=50,005,  $x_{wz}=49,9998$ , T=0,01. Wyniki pomiaru wzorca zestawiono w tabeli 2. Karta przebiegu pomiarów (karta kontrolna) pokazana jest na rys. 5. Tylko jeden punkt (który można potraktować jako wyskok) wyszedł poza granice kontrolne oddalone o  $\pm 3s_g$  od wartości średniej procesu pomiarowego. Wyniki obliczeń wskaźników zdolności zestawiono na rys. 6. Ich wartości wynoszą:  $C_g=6,39$ ;  $C_{gk}=2,81$ . System pomiarowy wykazuje stabilność i zdolność do wykonania pomiaru określonego specyfikacjami wyrobu.

Tabela 2. Wyniki pomiarów wzorca w przykładzie 1  
 Table 2. The results of measurement standard in the example 1

50,0004	50,0005	50,0005	50,0005	50,0004	50,0004	50,0006	50,0005
50,0003	50,0005	50,0003	50,0003	50,0003	50,0003	50,0003	50,0004
50,0003	50,0004	50,0004	50,0004	50,0004	50,0003	50,0004	50,0004
50,0003	50,0003	50,0003	50,0003	50,0003	50,0003	50,0003	50,0003
50,0003	50,0003	50,0004	50,0004	50,0004	50,0004	50,0003	50,0004
50,0003	50,0003	50,0002	50,0004	50,0003	50,0003	50,0004	50,0003
50,0004	50,0003						



Rys. 4. Schemat blokowy Procedury 2 - ocena systemu pomiarowego metodą R&R (opracowanie własne)  
 Fig. 4. The block diagram of Procedure 2 - the analysis of measurement system by R&R method (own report)



Rys. 5. Karta kontrolna 50-krotnego pomiaru wzorca z wykorzystaniem programu SOLARA firmy Q-DAS w przykładzie 1

Fig. 5. Control chart of 50-times measurement standard with the application of SOLARA (Q-DAS) program in the example 1

Dane specyfikacji		Dane z pomiarów		Dane statystyczne	
$x_m$	= 49,999800			$\bar{x}_g$	= 50,000360
DGS	= 49,9950	$x_{min g}$	= 50,0002	$s_g$	= 0,00078246
GGs	= 50,0050	$x_{max g}$	= 50,0006	$ Bi  =  \bar{x}_g - x_m $	= 0,000560
T	= 0,0100	$R_g$	= 0,0004		
		$n_{całk}$	= 50	$n_{ef}$	= 50
$C_g = \frac{0,2 \cdot T}{4 \cdot s_g}$		=	6,39		
$C_{gk} = \frac{0,1 \cdot T -  \bar{x}_g - x_m }{2 \cdot s_g}$		=	2,81		
%RES		=	1,00%		
System pomiarowy jest zdolny (RES,U,Cg,Cgk)					

Rys. 6. Graficzna ilustracja wartości wskaźników zdolności przyrządu pomiarowego z wykorzystaniem programu SOLARA firmy Q-DAS w przykładzie 1


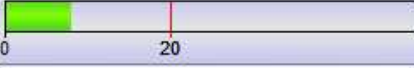
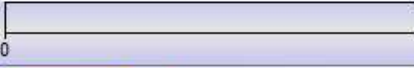
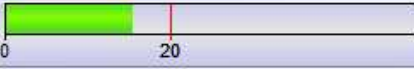

Fig. 6. The graphic presentation of the value of gauge capability indices with the application of SOLARA (Q-DAS) program in the example 1

**Przykład 2.** Analizie poddano używany system pomiarowy. Trzech operatorów wykonywało pomiary dwóch serii 10 wyrobów. Dane specyfikacji: DGS=5,97, GGS=6,03, T=0,06. Wyniki pomiaru zestawiono w tabeli 3. Wyniki obliczeń odtwarzalności i powtarzalności oraz wykresy wyników pomiaru dwóch serii wyrobów przez trzech operatorów A, B, C zestawiono na rys. 7. Dla analizowanego systemu pomiarowego uzyskano: powtarzalność %EV=13,18%; odtwarzalność %AV=8,00%; procentowy wskaźnik powtarzalności i odtwarzalności %R&R=15,42%. System pomiarowy należy uznać więc za zdolny.

Tab. 3. Wyniki pomiarów dwóch serii 10 wyrobów wykonanych przez trzech operatorów A, B, C w przykładzie 2  
Table 3. The measurement results of two series of 10 products made by three operators A, B, C in the example 2

Lp.	Operator A		Operator B		Operator C	
	Pomiar 1	Pomiar 2	Pomiar 1	Pomiar 2	Pomiar 1	Pomiar 2
1	6,029	6,03	6,033	6,032	6,031	6,03
2	6,019	6,02	6,02	6,019	6,02	6,02
3	6,004	6,003	6,007	6,007	6,01	6,006
4	5,982	5,982	5,985	5,986	5,984	5,984
5	6,009	6,009	6,014	6,014	6,015	6,014
6	5,971	5,972	5,973	5,972	5,975	5,974
7	5,995	5,997	5,997	5,996	5,995	5,994
8	6,014	6,018	6,019	6,015	6,016	6,015
9	5,985	5,987	5,987	5,986	5,987	5,986
10	6,024	6,028	6,029	6,025	6,026	6,025



Wartość średnia	=	$\bar{x}_g$	=	$6,00017 \leq 6,00502 \leq 6,00986$	
Mediana	=	$\tilde{x}_g$	=	6,0090	
Wartość najmniejsza	=	$x_{min g}$	=	5,971	
Wartość największa	=	$x_{max g}$	=	6,033	
Rozstęp	=	$R_g$	=	0,062	
Liczba analizowanych pomiarów	=	$n_{ef}$	=	60	
Łączna liczba pomiarów	=	$n_{całk}$	=	60	
Powtarzalność EV	=	%EV	=	13,18%	
Odtwarzalność AV	=	%AV	=	8,00%	
Wzajemne oddziaływanie IA	=	%IA	=	---	
Rozrzut Systemu Pomiarowego GRR	=	%R&R	=	15,42%	
 <span style="margin: 0 100px;">System pomiarowy jest zdolny (RES,U,R&amp;R)</span> 					
Q-DAS Messunsicherheit (03/2005): Verfahren 2					

Rys. 7. Arkusz wyników obliczeń odtwarzalności i powtarzalności z wykorzystaniem programu SOLARA firmy Q-DAS w przykładzie 2

Fig. 7. The calculation results sheet of reproducibility and repeatability obtained with the application of SOLARA (Q-DAS) program in the example 2

#### 4. WNIOSKI

W każdym procesie technologicznym wykazana być musi zdolność narzędzi bądź systemów pomiarowych. Klienci przedsiębiorstw produkcyjnych często wręcz wymagają dowodu przydatności narzędzi pomiarowych w poszczególnych operacjach procesu. Bezwzględną koniecznością staje się okazanie takiej przydatności w przypadku produkcji opartej na certyfikowanych systemach zarządzania jakością np. ISO 9000.

Procedury oceny zdolności narzędzi bądź systemów pomiarowych często znane są powierzchownie bądź stosowane wybiórczo. Zamysłem autora było skompletowanie tych procedur w jedną logiczną całość ujmującą analizę niepewności pomiarowej (której w artykule nie rozwijano ze względu na jego ograniczony rozmiar), powtarzalności i odtwarzalności pomiarów, jak również zdolności systemów pomiarowych. Pisząc artykuł kierowano się chęcią zwrócenia uwagi na wagę problemu, jakim jest solidne zbadanie procesu pomiarowego, w sensie jego zdolności. Omijanie tego problemu niejednokrotnie prowadzi do fatalnych skutków w ocenie jakości wyrobów.

W artykule zaproponowano metodykę oceny systemów pomiarowych wraz ze wspomaganiami komputerowymi, przykładowo wykorzystującym program SOLARA firmy

Q-DAS, dedykowany przede wszystkim dla procesów stosowanych w przemyśle maszynowym.

#### LITERATURA

- [1] BARRENTINE L.B., 2003, *Concept for R&R Studies*, ASQ Press.
- [2] DIETRICH E., SCHULZE A., 2000, *Metody statystyczne w kwalifikacji środków pomiarowych, maszyn i procesów produkcyjnych*, Notika System.
- [3] MONTGOMERY D.C., 2005, *Introduction to Statistical Quality Control. Fifth Edition*, John Wiley & Sons, Inc. USA.
- [4] PEREZ-WILSON M., 2003, *Gauge R&R Studies*, ASC Press.
- [5] SAŁACIŃSKI T., 2009, *SPC – Statystyczne sterowanie procesami produkcji*, OWPW.
- [6] SMITH G.M., 2004, *Statistical Process Control and Quality Improvement*, Pearson Education, New Jersey.
- [7] ISO-10012, 2003, *Measurement management system – Requirements for measurement processes and measuring equipment*.
- [8] *Measurement Systems Analysis MSA-Third Edition, 2002, Reference manual*, AIAG-Work Group, Daimler-Chrysler Corporation, Ford Motor Company, General Motors Corporation.

#### ANALYSIS OF TOOLS AND MEASUREMENT SYSTEMS CAPABILITIES

The gauge and measuring system capability indices, used in machine manufacturing processes, are defined in the article. These indices have been not too much practically applied. A methodology for capability analyzing has been proposed, based on three procedures and  $C_g$  and  $C_{gk}$  indices. Practical calculation examples are shown with interpretation of the results. Presented methodic has complete characteristics, that is, it reflects estimation of measurement uncertainty, R&R (reproducibility and repeatability) method and control charts of measurements. Statistical analysis was made with application of SOLARA (Q-DAS) program dedicated to manufacturing processes in machine industry.