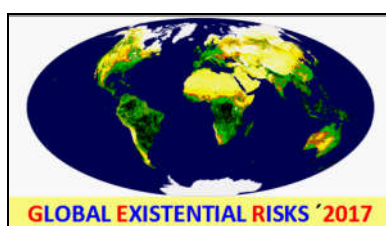


ANALIZA POWTARZALNOŚCI I ODTWARZALNOŚCI SYSTEMU POMIAROWEGO TULEI Z WYKORZYSTANIEM METODYKI R&R

Małgorzata KAWALEC

THE ANALYSIS OF REPEATABILITY AND REPRODUCIBILITY OF THE MEASUREMENT SYSTEM APPLIED TO SLEEVE USING THE R&R METHODOLOGY



STRESZCZENIE

W czasach kiedy dążenie do wysokiej jakości jest obowiązkiem, przedsiębiorstwa starają się podnosić jakość swoich produktów w różny sposób. Niezależnie od stosowanych metodyk podstawowym zadaniem jest dotarcie do źródła problemów. Aby to uczynić konieczne jest posiadanie skwantyfikowanej informacji m.in. o charakterze liczbowym. Żeby móc podejmować decyzje w oparciu o takie dane trzeba mieć jednak pewność, że system pomiarowy który posłużył do ich zebrania, jest poprawny. Z tego typu problemem spotkało się jedno z przedsiębiorstw położonych w Województwie Podkarpackim (Polska południowo-wschodnia) przy produkcji tulei grafitowej. Celem opracowania było przeprowadzenie analizy powtarzalności i odtwarzalności, w oparciu o metodykę R&R, pomiarów wymiaru krytycznego analizowanej tulei. Analiza ta pokazała, że system jest akceptowalny, ale warunkowo. Prawdopodobna przyczyna problemów nie tkwiła w systemie pomiarowym. Jednak zaproponowano działania doskonalące ten system. Zaprezentowane opracowanie może być wykorzystywane w dowolnych organizacjach pragnących weryfikować swoje systemy pomiarowe.

SŁOWA KLUCZOWA: analiza R&R, system pomiarowy, powtarzalność, odtwarzalność

ABSTRACT

In times when the pursuit of high quality is an obligation, enterprises try to raise the quality of their products in different ways. Regardless of the applied methodology the fundamental task is coming to the source of difficulties. For that purpose it becomes necessary to have quantified information expressed among other things in numbers. However, to be able to make decisions based on such data one must be sure that the measurement system that was used to collect the data has been correct. One of the enterprises located in the Podkarpackie voivodship (south-east Poland) met the problem with the production of a graphite sleeve. The aim of the study was making the analysis of repeatability and reproducibility, based on the R&R methodology, applied to the measurement of the critical dimension of the analyzed sleeve. The analysis showed that the system has been acceptable but conditionally. Probable reason for difficulties was not located within the measurement system. However, certain actions were proposed to improve the system. The presented study can be used in any organization wishing to verify its measurement systems.

KEY WORDS: R&R analysis, measurement system, repeatability, reproducibility



WPROWADZENIE

Zmiany w gospodarce, jakie zaszły w ostatnich latach, sprawiły że jakość produktów stała się bardzo istotnym kryterium decydującym o sukcesie przedsiębiorstwa na rynku. Jednym z istotniejszych elementów kształtowania jakości produktów jest jakość systemu pomiarowego. System pomiarowy to zbiór jednostek funkcjonalnych, które tworzą całość organizacyjną, objętych wspólnym sterowaniem i przeznaczony do realizacji celu metrologicznego. Sterowanie systemem realizowane jest przez kontrolera, który działa według wypracowanego algorytmu. W zależności od przeznaczenia rozróżnia się trzy rodzaje systemów pomiarowych: badawcze, pomiarowo-kontrolne oraz pomiarowo-diagnostyczne [1, 3, 7].

Jakość systemu pomiarowego wpływa bezpośrednio na jakość otrzymanych wyników badań, a w związku z tym również na jakość analiz, które przeprowadza się na podstawie tych danych. Dobry system pomiarowy to ten, który charakteryzuje się tym, że kilkanaście kolejnych pomiarów danego przedmiotu daje wyniki zbliżone do siebie bądź identyczne.

Do opisanie jakości systemu pomiarowego używa się najczęściej wielkości statystycznych, takich jak dokładność i wariancja. Dokładność przedstawia przede wszystkim położenie danych w odniesieniu do wartości rzeczywistej, natomiast wariancja – rozpiętość danych. Duża wariancja wyników pomiarów bardzo często powoduje niską jakość danych. Spowodowane jest to najczęściej wpływem zmian otoczenia na układ pomiarowy. Im większy wpływ warunków otoczenia na wynik pomiaru, tym zebrane dane stają się mniej użyteczne [9].

Zmienność systemu pomiarowego szacuje się przez ocenę jego krótko- lub długoterminowej zdolności. Zmienność krótkoterminowa, to inaczej zdolność systemu pomiarowego, natomiast długoterminowa – sprawność systemu pomiarowego. Ocena zdolności systemu pomiarowego wyrażana jest przez błąd oczekiwany dla określonych warunków, rozstęp i zasięg systemu.

Jak już wspomniano, do realizowania zadań i osiągnięcia celów konieczne jest dysponowanie zasobem środków pozwalających kształtować jakość wyrobu na wszystkich etapach w cyklu jego istnienia. Jakość wyrobu musi być zaś mierzona za pomocą odpowiedniego systemu pomiarowego. Wtedy dopiero ma się gwarancję, że uzyskane wyniki pomiarów są prawdziwe i mogą się one stać podstawą do podejmowania doskonalących decyzji. Przykład takiego praktycznego wykorzystania jednej z metodyk oceny systemu pomiarowego przedstawiono w opracowaniu. Zadanie to wykonano w celu upewnienia się czy źródłem przyczyn problemów dotyczących wymiaru krytycznego wyrobu nie jest tylko pomiar. Wykonując analizę przyczyn zmienności krytycznego wymiaru tulei metodą R&R (powtarzalności i odtwarzalności pomiarów) ustalono źródło problemu.

ANALIZA R&R

Analiza powtarzalności i odtwarzalności pomiarów (ang. *Repeatability and Reproducibility Study* – w skrócie „R&R”) stanowi obecnie najczęściej stosowaną i najefektywniejszą metodę oceny przydatności systemów pomiarowych do wykonywania określonych zadań pomiarowych. Główną częścią tej metody jest wyznaczenie wskaźnika powtarzalności i odtwarzalności R&R. Wyznaczenie tego wskaźnika odbywa się poprzez pomiar wybranego wyrobu przy wykorzystaniu analizowanego systemu pomiarowego. Podstawowym celem przeprowadzenia analizy wskaźnika R&R jest zbadanie powodów zmienności procesu pomiaru, aby można było zinterpretować oraz zminimalizować wpływ tych powodów na zmienność procesu. Ta metoda uwzględnia interpretację zróżnicowania pomiarów wykonanych przyrządami pomiarowymi (powtarzalność) oraz wahania pomiarów wykonywanych przez pracowników (odtwarzalność) [5].

Analiza R&R polega na wykonywaniu kilku serii pomiarów danej wielkości mierzonej dla losowo wybranej partii produktów przez kilku operatorów. Możliwe są 3 odmiany analizy R&R. Zostały one zaprezentowane w tab. 1.



Tab.1. Zestawienie odmian metody R&R. Opracowanie własne na podstawie [1, 2, 6, 9]

Lp.	Odmiana R&R	Krótką charakterystyka odmiany R&R
1.	Analiza zdolności środków pomiarowych TYP 1.	Celem metody jest wstępna kwalifikacja przyrządu pomiarowego poprzez ocenę jego zdolności. Metoda nie pozwala na oddzielenie powtarzalności i odtwarzalności systemu pomiarowego. Wynikiem analizy są: współczynniki zdolności przyrządu pomiarowego Cg, Cgk zawierające w sobie: błąd systematyczny przyrządu i błąd przypadkowy przyrządu.
2.	Analiza zdolności środków pomiarowych TYP 2 (wersja uproszczona).	Celem metody jest szybka, doraźna ocena zdolności systemu pomiarowego. Metoda nie pozwala na oddzielenie powtarzalności i odtwarzalności systemu pomiarowego. Wynikiem analizy jest wypadkowa wartość powtarzalności i odtwarzalności R&R zawierająca „w sobie”: powtarzalność przyrządu (EV) i odtwarzalność operatorów (AV)
3.	Analiza zdolności środków pomiarowych TYP 2 (wersja pełna).	Celem metody jest okresowa pełna ocena zdolności systemu pomiarowego. Metoda pozwala na oddzielenie powtarzalności i odtwarzalności systemu pomiarowego. Uwzględnia rozgraniczenie wpływu przyrządu (powtarzalność EV) i operatorów (odtwarzalność AV) na rozrzut wskazań (R&R) systemu pomiarowego.

Obliczeń odchyłeń standardowych na podstawie rozstępów dokonuje się korzystając ze wzorów z tab.2.

Tab.2. Podstawowe wzory stosowane do przeprowadzenia analizy R&R [na podst. 1, 2, 5]

Lp.	Wielkość	Wzór	Stałe
1.	Powtarzalność EV	$EV = K_1 \cdot R_{sr}$	Liczba powtórzeń – r r = 2 → K ₁ = 4,56 r = 3 → K ₁ = 3,05
2.	Odtwarzalność AV	$AV = \sqrt{(X_{DIFF} \cdot K_2)^2 - EV^2 / (n \cdot r)}$	Liczba operatorów - k k = 2 → K ₂ = 3,65 k = 3 → K ₂ = 2,7
3.	Powtarzalność i odtwarzalność R&R	$R\&R = \sqrt{AV^2 + EV^2}$	

R_{sr} – rozstęp średni z rozstępów pomiarów poszczególnych części przez poszczególnych operatorów we wszystkich powtórzeniach
 X_{DIFF} – rozstęp średnich wszystkich wyników pomiarów uzyskanych przez poszczególnych operatorów

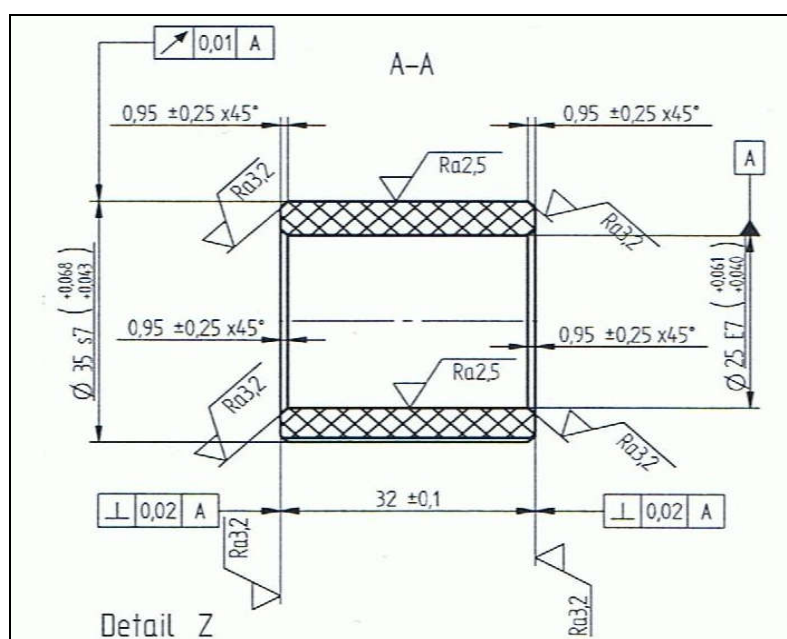
Po dokonaniu pomiarów i wykonaniu wszystkich obliczeń należy przeanalizować ich wyniki. Kryteria oceny systemu pomiarowego są następujące:

- %R&R do 10% – systém pomiarový je akceptovaný,
- $30\% > \%R\&R > 10\%$ – systém pomiarový je akceptovaný warunkowo,
- %R&R powyżej 30% – systém pomiarový je nie do przyjęcia.

ANALIZA POWTARZALNOŚCI I ODTWARZALNOŚCI DLA TULEI

Analizowaną częścią była tuleja grafitowa. Przedstawiono ją na rys. 1. Tulejka ma wykonany otwór przelotowy z fazowaniem na końcach oraz rowek na całej długości o głębokości równej 0,6 mm i promieniu równym 2 mm. Wymiarem krytycznym jest wymiar $\phi 35 s7^{+0,068}_{+0,043}$, stanowiący średnicę zewnętrzną tulei (pasowanie właczane, tolerancja 0,025 mm).

Do oceny systemu pomiarowego wykorzystano tulejkę grafitową (rys.1), na której dokonano pomiarów średnicy zewnętrznej. Wykonało je trzech operatorów oznaczonych: A, B, C. Każdy pomiar został powtórzony dwukrotnie, przy liczności próbki wynoszącej 10 elementów. Próbkę pobierano w sposób zapewniający losowość. Badane części zmierzone zostały mikrometrem czujnikowym (parametr DIN 863, MMCf) (MAUa – E1) o rozdzielczości 0,001 mm i zakresie 25-50 mm. Dobrano go zgodnie z powszechnie uznanym i stosowanym warunkiem przyjęcia przyrządu do zadania pomiarowego, przyjmującym, że dokładność przyrządu powinna stanowić od 0,1 do 0,2 tolerancji [4, 8]. Wyniki analizy powtarzalności i odtwarzalności przedstawiono w tab. 3. W tablicy tej zestawiono również wyniki obliczeń R&R, tworząc uproszczony arkusz obliczeń powtarzalności i odtwarzalności.



Rys.1. Fragment rysunku konstrukcyjnego z zaznaczoną średnicą krytyczną tulejki.

Zgodnie z założeniami analizy powtarzalności i odtwarzalności zadbano, aby operatorzy nie sugerowali się nawzajem swoimi wynikami pomiarów. Dlatego pomiary realizowano w różnym czasie. Pomiar przeprowadzony został w ten sposób, aby uniemożliwić operatorowi porównywanie wyników kolejnych powtórzeń. W tym celu podawano operatorom przedmioty do mierzenia w różnej kolejności, oznaczając przedmioty w celu ich identyfikacji w sposób niewidoczny dla operatora. Zadbano, aby losowo wybrane do mierzenia przedmioty jak najbardziej reprezentowały zmienność własną procesu. Wyniki pomiarów przedstawiono w tab. 3.

Tab. 3. Wyniki pomiarów użyte do analizy R&R.

OPERATOR	PRÓBKA										WARTOŚĆ ŚREDNIA
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
A1	35.045	35.047	35.080	35.050	35.048	35.050	35.050	35.049	35.050	35.051	35.050
2	35.044	35.048	35.059	35.050	35.043	35.049	35.050	35.049	35.047	35.050	35.049
3	35.048	35.047	35.081	35.049	35.047	35.051	35.048	35.049	35.048	35.049	35.050
WARTOŚĆ ŚREDNIA	35.045	35.047	35.080	35.050	35.043	35.050	35.049	35.049	35.043	35.050	$X_A = 35.0498$
ZAKRES	0.002	0.001	0.002	0.001	0.001	0.002	0.002	0.000	0.003	0.002	$R_A = 0.0016$
B1	35.048	35.048	35.080	35.049	35.049	35.050	35.051	35.050	35.048	35.050	35.050
2	35.045	35.047	35.080	35.051	35.047	35.048	35.048	35.049	35.049	35.050	35.049
3	35.048	35.048	35.061	35.050	35.043	35.049	35.049	35.043	35.050	35.049	35.050
WARTOŚĆ ŚREDNIA	35.048	35.048	35.080	35.050	35.043	35.049	35.049	35.049	35.049	35.050	$X_B = 35.0493$
ZAKRES	0.001	0.001	0.001	0.002	0.002	0.002	0.003	0.002	0.002	0.001	$R_B = 0.0017$
C1	35.048	35.047	35.059	35.050	35.043	35.049	35.050	35.049	35.050	35.050	35.050
2	35.045	35.048	35.080	35.051	35.050	35.043	35.048	35.049	35.052	35.052	35.050
3	35.048	35.048	35.081	35.049	35.049	35.051	35.049	35.051	35.049	35.052	35.051
WARTOŚĆ ŚREDNIA	35.048	35.047	35.080	35.050	35.049	35.049	35.049	35.050	35.050	35.051	$X_C = 35.0501$
ZAKRES	0.001	0.002	0.002	0.002	0.002	0.003	0.002	0.002	0.003	0.002	$R_C = 0.0021$
WARTOŚĆ ŚRODKOWA	35.0454	35.0471	35.0601	35.0499	35.0482	35.0494	35.0492	35.0492	35.0492	35.0503	$X_S = 35.050$ $R_S = 0.0147$

Tok obliczeń, zgodny z [2, 5], podano w poniższych 10 punktach:

- 1) Obliczenie średnich rozstępów dla wyników pomiarów trzech różnych operatorów (A, B, C) według wzoru:

$$\overline{R_A} = \frac{\sum_{i=1}^{10} R_{Ai}}{10} = 0,002 \text{ mm} \quad (1)$$

$$\overline{R_B} = \frac{\sum_{i=1}^{10} R_{Bi}}{10} = 0,002 \text{ mm} \quad (2)$$

$$\overline{R_C} = \frac{\sum_{i=1}^{10} R_{Ci}}{10} = 0,002 \text{ mm} \quad (3)$$

- 2) Obliczanie średniej średnich rozstępów według wzoru:

$$\overline{\overline{R}} = \frac{\overline{R_A} + \overline{R_B} + \overline{R_C}}{3} = 0,002 \text{ mm} \quad (4)$$

- 3) Obliczanie średniej wyników pomiarów operatorów A, B, C według wzoru:

$$\bar{x}_A = \frac{\sum_{i=1}^{30} x_{Ai}}{30} = 35,050 \text{ mm} \quad (5)$$

$$\bar{x}_B = \frac{\sum_{i=1}^{30} x_{Bi}}{30} = 35,050 \text{ mm} \quad (6)$$

$$\bar{x}_C = \frac{\sum_{i=1}^{30} x_{Ci}}{30} = 35,050 \text{ mm} \quad (7)$$

- 4) Obliczanie różnicy między największą i najmniejszą wartością średnią według wzoru:

$$\bar{x}_{DIFF} = \bar{x}_{\max} - \bar{x}_{\min} = 0,0 \text{ mm} \quad (8)$$

gdzie:

\bar{x}_{\max} – największa wartość średnia,

\bar{x}_{\min} – najmniejsza wartość średnia.

- 5) Obliczanie powtarzalności (EV)

$$EV = k_1 \cdot \bar{R} = 0,006 \quad (9)$$

gdzie:

\bar{R} – średnia średnich rozstępów,

$k_1 = 3,05$ dla 3 serii pomiarów.

Współczynnik k_1 zależy od liczby prób oraz liczby wyrobów pomnożonych przez liczbę pracowników.

- 6) Obliczanie odtwarzalności (AV) według wzoru:

$$AV = \sqrt{(\bar{x}_{DIFF} \cdot k_2)^2 \cdot \left(\frac{EV^2}{n \cdot r}\right)} = \sqrt{(0,0 \cdot 2,7)^2 \cdot \left(\frac{0,006^2}{10 \cdot 3}\right)} = 0,0 \quad (10)$$

gdzie:

\bar{x}_{DIFF} – różnica między największą i najmniejszą wartością średnią,

n – liczba próbek,

r – liczba prób,

$k_2 = 2,70$ dla 3 serii pomiarów.

Jeżeli $(\bar{x}_{DIFF} \cdot k_2)^2 \gg \left(\frac{EV^2}{n \cdot r}\right)$ dla uproszczenia można zastosować: $AV = \bar{x}_{DIFF} \cdot k_2$.

Gdy $(\bar{x}_{DIFF} \cdot k_2)^2 \leq \left(\frac{EV^2}{n \cdot r}\right)$ wyrażenie pod pierwiastkiem równa się 0 bądź jest ujemne.

Odtwarzalność jest mniejsza, a więc może być zaniedbana.

Współczynnik k_2 zależy od liczby pracowników.

- 7) Obliczanie wskaźnika R&R:

$$R\&R = \sqrt{EV^2 + AV^2} = \sqrt{0,006^2 + 0,0^2} = 0,006 \quad (11)$$

- 8) Obliczanie powtarzalności procentowej w odniesieniu do tolerancji:

$$\%EV = \frac{EV}{T} \cdot 100\% = \frac{0,006}{0,025} \cdot 100\% = 24,0\% \quad (12)$$

- 9) Obliczanie odtwarzalności procentowej w odniesieniu do tolerancji:

$$\%AV = \frac{AV}{T} \cdot 100\% = \frac{0,0}{0,025} \cdot 100\% = 0,0\% \quad (13)$$

- 10) Obliczanie procentowego wskaźnika powtarzalności i odtwarzalności:

$$\%R\&R = \%EV + \%AV = 24,0\% \quad (14)$$

Na podstawie analizy obliczonych wartości %AV, %EV i %R&R można stwierdzić, że system jest warunkowo akceptowany, ponieważ wartość %R&R znajduje się w przedziale 11%-30%.

PODSUMOWANIE

Analiza powtarzalności i odtwarzalności jest skutecznym środkiem kontroli systemu pomiarowego pod względem jego zmienności, jak również pod względem wpływu na niego czynników zewnętrznych, które mogą powodować jego zakłócenie. Jest również metodą niedrogą, prostą w przeprowadzeniu i łatwą pod względem analizy uzyskanych wyników. Pozwala ona także w prosty sposób wykryć źródło zakłócenia przebiegu procesu i szybko je wyeliminować. Tak więc i w tym konkretnym przypadku przeprowadzona analiza pozwoliła szybko ocenić powtarzalność i odtwarzalność przyjętego systemu pomiarowego.

Wyniki testu systemu pomiarowego wypadły pozytywnie. Wartość parametru %R&R wynosi 24% co oznacza, że system pomiarowy jest warunkowo akceptowalny, ponieważ wartość ta znajduje się w przedziale poniżej 30%. Nie jest ona jednakmała, gdyż wyraźnie przewyższa graniczną wartość 10%. Wartości parametrów EV oraz AV, reprezentujących powtarzalność i odtwarzalność, powinny być jak najmniejsze, co w przypadku %AV było osiągnięte.

Uzyskane wyniki wskazują na to, że w doskonaleniu systemu pomiarowego wskazane jest skupić uwagę szczególnie na powtarzalności %EV, ponieważ jej wartość najbardziej odróżnia się od wartości pożądanej. Ze względu na uzyskane wyniki jako potencjał do doskonalenia należałoby wskazać na konieczność dbania o przyrząd pomiarowy, tj. dokonywania regularnych przeglądów jego stanu technicznego, regularnego wzorcowania oraz odpowiedniego konserwowania.



LITERATURA

- [1] Analiza powtarzalności i odtwarzalności przyrządu pomiarowego. TQM – SOFT, Warszawa 2007.
- [2] Antosz K.: Zastosowanie metody R&R do analizy wybranych systemów pomiarowych. *Technologia i Automatyzacja Montażu*, 3/2012.
- [3] Gawlik J., Rewilak J., Tokaj J.: Nowe wskaźniki efektywności procesu wdrażania produkcji nowatorskich wyrobów, realizowanego na podstawie wytycznych branży motoryzacyjnej. *Zarządzanie Przedsiębiorstwem*, Nr 1, 2013, str. 2-10.
- [4] Jakubiec W., Malinowski J.: Metrologia wielkości geometrycznych. WNT, Warszawa 2004.
- [5] Measurement System Analysis. Reference Manual, 4th Edition. June 2010.
- [6] Michczyński A.: Metody analizy danych pomiarowych. Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, Gliwice, 2005.
- [7] Pacana A., Dziedzic A.: Nadzorowanie urządzeń do pomiarów i monitorowania w systemach ISO 9001:2000 i HACCP. *Эффективность в Техносфере XXI Века. Сборник трудов XIV международной научно – технической конференции. Том 5. str. 183-187, Донецк 2007.*
- [8] PN-EN ISO 14253-1:2000 „Specyfikacje geometrii wyrobów (GPS) – kontrola wyrobów i sprzętu pomiarowego za pomocą pomiarów – Reguły orzekania zgodności lub niezgodności ze specyfikacją”. PKN, Warszawa 2000.
- [9] Sęp J., Perłowski R., Pacana A.: Instrumentarium systemu zarządzania jakością. Oficyna Wydawnicza PRZ, Rzeszów 2006.

CONTACT ADDRESS

Mgr Malgorzata KAWALEC

Poland

e-mail: mkawalec@onet.eu

RECENZIA TEXTOV V ZBORNÍKU

Recenzované dvomi recenzentmi, členmi vedeckej rady konferencie. Za textovú a jazykovú úpravu príspevku zodpovedajú autori.

REVIEW TEXT IN THE CONFERENCE PROCEEDINGS

Contributions published in proceedings were reviewed by two members of scientific committee of the conference. For text editing and linguistic contribution corresponding authors.