

KWALIFIKACJA SYSTEMU POMIAROWEGO DITLENKU WĘGLA DO NADZOROWANIA I DOSKONALENIA PROCESU OTRZYMYWANIA POWIETRZA ODDECHOWEGO PRZEZNACZONEGO NA TLENOWE WARUNKI HIPERBARYCZNE

Arkadiusz Woźniak

Katedra Technologii Prac Podwodnych Akademii Marynarki Wojennej w Gdyni

STRESZCZENIE

Utrzymanie stabilnej zawartości ditlenku węgla poniżej ustalonych wymagań krytycznych CTQ¹ w procesie otrzymywania powietrza oddechowego na hiperbaryczne warunki tlenowe ma istotne znaczenie dla bezpieczeństwa wykonywania prac podwodnych. W artykule podjęto tematykę walidacji wytypowanego systemu pomiarowego do kontroli online procesu produkcji czynnika oddechowego oraz opisano zagadnienia zastosowania wielowymiarowych systemów sensorycznych do kontroli parametrów krytycznych procesu produkcyjnego w systemach produkcyjnych, przewidzianych do intensywnej eksploatacji w oddaleniu od baz zaopatrywania. W takim przypadku należy rozważyć możliwość wykonywania pomiaru zanieczyszczeń w trybie online². Monitoring analizowanego procesu z punktu widzenia możliwości minimalizacji jego zmienności powinien być zorientowany na pomiar wartości wejściowych lub procesowych w taki sposób aby już na etapie produkcji zapobiegać wystąpieniu potencjalnych defektów. Ocenę wytypowanego do badań systemu pomiarowego CCS³ przeznaczonego do kontroli zawartości ditlenku węgla przeprowadzono w KTHP AMW⁴ dla systemu zasilania sprężonym powietrzem kompleksu DGKN – 120⁵. Ocenę systemu prowadzono z wykorzystaniem procedur MSA⁶ oraz metod statystycznego sterowania procesem SPC⁷. **Słowa kluczowe:** nurkowe czynniki oddechowe, systemy pomiarowe, jakość powietrza oddechowego do celów nurkowych, analiza systemu pomiarowego.

ARTICLE INFO

PolHypRes 2019 Vol. 69 Issue 4 pp. 7 – 32

ISSN: 1734-7009 **eISSN:** 2084-0535

DOI: 10.2478/phr-2019-0017

Strony: 26, rysunki: 11, tabele: 1

page www of the periodical: www.phr.net.pl

Typ artykułu: oryginalny

Termin nadesłania: 22.02.2019 r.

Termin zatwierdzenia do druku: 23.04.2019 r.

Publisher

Polish Hyperbaric Medicine and Technology Society



WSTĘP

Celem podstawowym dotychczas realizowanego w SZ RP projektu racjonalizacji procesu otrzymywania, utrzymywania i dystrybucji powietrza oddechowego przeznaczonego na tlenowe warunki hiperbaryczne była minimalizacja zmienności obserwowanego procesu oraz zachowanie jego stabilności w czasie. Racjonalizację analizowanego procesu produkcyjnego przeprowadzono przy wykorzystaniu podejścia *SixSigma*. W trakcie racjonalizacji procesu dążono do trwałego przekroczenia poziomu 6σ . Obserwując racjonalizowany proces otrzymywania, utrzymywania i dystrybucji powietrza oddechowego dopuszczonego na tlenowe warunki hiperbaryczne w Siłach Zbrojnych RP, zauważono, że przy ówczesnym stanie dostępnej techniki nie jest możliwe osiągnięcie takiego poziomu zdolności procesu dla całego analizowanego systemu [1].

Eliminacja zidentyfikowanych zagrożeń dla wszystkich podprocesów wspomagających proces otrzymywania powietrza oddechowego do celów hiperbarycznych przyczyniła się do obniżenia liczby występujących niezgodności. Obniżeniu liczby niezgodności w zakresie zawartości H_2O nie towarzyszyło proporcjonalne zmniejszenie liczby defektów w zakresie zawartości ditlenku węgla CO_2 . Jak przedstawiono w fazie doskonalenia procesu, zawartość CO_2 w całej badanej populacji wyników pomiarowych po początkowym spadku powróciła do poprzedniego poziomu około 20% defektów występujących w latach 2011–2012. Świadczy to o ograniczeniach wprowadzonych zmian technologicznych. Jak stwierdzono w wyniku prowadzonej analizy, występowanie ewentualnych błędów operatora miała istotny wpływ na spełnienie krytycznych wymagań jakościowych CTQ. Wskazuje to na ograniczenia dotychczas stosowanej technologii.

Przyjęto, że dalszą poprawę można osiągnąć jedynie poprzez jej zmianę. Na podstawie dokonanej oceny stwierdzono że, dla wykorzystywanych systemów istnieją możliwości stabilnego utrzymania zdolności procesu na poziomie $2,8\sigma$ ⁸. Miary jakości stosowane w podejściu 6σ zostały wcześniej opisane i nie będą tutaj przytaczane [1]. Z drugiej strony śledząc rozwiązania techniczne i opisy dostępne na rynku techniki, wykazano, że osiągnięcie zdolności procesu na poziomie $4,5\sigma$ [2] powinno być możliwe. Wprowadzone systemy sprężania posiadają potencjał do ich usprawnienia przede wszystkim w zakresie zwiększenia ich odporności na występowanie potencjalnych błędów obsługi oraz bieżącej kontroli nadzorowanego procesu. Wyniki dotychczasowych badań skłaniały do rozważenia potencjalnych kierunków zmianę technologii produkcji szczególnie w zakresie eliminacji i kontroli bieżącej zawartości ditlenku węgla CO_2 np. poprzez zastosowanie filtrów oczyszczania wstępnego substratu⁹ których problematyka nie będzie tutaj przedstawiana w połączeniu z wykorzystaniem wielowymiarowych systemów sensorycznych do kontroli parametrów krytycznych¹⁰ procesu produkcyjnego.

Wydaje się to szczególnie istotne w systemach produkcyjnych, przewidzianych do intensywnej eksploatacji w oddaleniu od baz zaopatrywania. W takim przypadku należy rozważyć możliwość wykonywania pomiarów eksploatacyjnych zanieczyszczeń szkodliwych w trybie *online*¹¹. Jak wspomniano monitoring procesu z punktu widzenia możliwości minimalizacji jego zmienności należy zorientować na pomiar wartości wejściowych lub procesowych w taki sposób aby już na etapie produkcji zapobiegać wystąpieniu potencjalnych defektów. W wyniku dotychczasowych badań [1] wykazano potencjalną możliwość osiągnięcia krótkoterminowej zdolności procesu. Przeprowadzone badania i analiza ryzyka m. in. *FMEA*¹² dla racjonalizowanego procesu wykazała konieczność zwiększenia odporności systemów na potencjalnie występujące zakłócenia procesu spowodowane zanieczyszczeniem atmosfery w okolicach czerpni systemów sprężających oraz brakiem bieżącej kontroli zdolności procesu.

W celu zmniejszenia objętości pracy wiele wzorów umieszczono w tekście przenosząc partie wzorów pomiędzy wierszami. Dzielenie wzorów odbywało się w miejscach, gdzie znajdowały się operatory działań matematycznych w taki sposób, że występowały one redundantnie na końcu poprzedniego i na początku następnego wiersza.

SYTUACJA PROBLEMOWA

W efekcie dotychczas przeprowadzonych prac zaproponowano kierunki dalszych badań przemysłowych oraz sformułowano zalecenia dotyczące nadzoru nad zracjonalizowanym procesem produkcyjnym. Zagadnienia dotyczące oceny wpływu systemów zabezpieczeń na proces otrzymywania, utrzymywania i dystrybucji powietrza oddechowego przeznaczonego na tlenowe warunki hiperbaryczne są istotnym elementem procesu produkcyjnego. Wykazano, że dla obecnie stosowanej najlepszej dostępnej na świecie technologii otrzymywania, utrzymywania i dystrybucji powietrza oddechowego przeznaczonego na tlenowe warunki hiperbaryczne największy potencjał stanowią systemy zabezpieczające, zarówno w formie prostej¹³, jak i w postaci systemów wyposażonych w wielowymiarowe systemy sensoryczne, ekspertowe i aktuatory¹⁴ [1].

Opracowanie dedykowanych systemów pomiarowych dla nadzorowania i kontroli bieżącej produkcji czynników oddechowych wymaga przeprowadzenia badań przemysłowych. W zakończonym projekcie [1] założono, że skoncentrowanie się na usuwaniu zawartości H_2O z czynnika oddechowego spowoduje również proporcjonalne obniżenie zawartości innych zanieczyszczeń. Implementacja nowych systemów puryfikacyjnych oraz systemów sprężania potwierdziła to w stosunku do wszystkich rozpatrywanych zanieczyszczeń z wyjątkiem zawartości ditlenku węgla CO_2 , którego obniżenie było niższe od spodziewanego.

Pomimo podjętych działań eliminujących zakłócenia rozpatrywanego procesu liczba generowanych defektów procesu produkcyjnego uniemożliwiała utrzymanie stabilnego i zdolnego procesu. Ocena ryzyka procesu wykazała, że zastosowanie urządzeń pomiarowych służących do bieżącej kontroli procesu w zakresie kontroli parametrów krytycznych zawartości ditlenku węgla stanowi istotny element zapobiegający powstawaniu wad. Zastosowanie progowych wskaźników analitycznych jak wykazano w analizie *FMEA* powodują podniesienie detekcji z poziomu niepełnej $98\% > D_{\%} \geq 90\%$ do idealnej $D_{\%} \cong 100\%$ wywołuje spadek względnej liczbowej oceny prawdopodobieństwa detekcji z $D = 9$ do $D = 1$. Pociąga to za sobą spadek wartości względnej liczby ryzyka do akceptowalnego poziomu $RPN = 72$ [1].

Zanieczyszczenia substratu, wyczerpanie złoża puryfikacyjnego wkładu filtracyjnego, awaria systemu wentylacji pomieszczeń, błędy obsługi m. in. stanowią istotne źródło przyczyn powstawania wad w rozpatrywanym procesie produkcyjnym. Proponowane systemy pomiarowe powinny być wykorzystane do kontroli procesu w sposób gwarantujących

utrzymanie zdolności pomiarowej zgodnej z wymaganiami przewidzianymi dla systemów pomiarowych.

Aby wnioskować o przebiegu procesu należy prawidłowo analizować i interpretować wykonywane pomiary dokonane za pomocą zdolnych¹⁵ systemów pomiarowych. Zgodnie z wymaganiami PN-EN ISO 10012 skuteczny system zarządzania pomiarami [3] powinien zapewnić ich przystosowanie do zamierzonego użycia oraz mają istotny wpływ na osiągnięcie celów dotyczących jakości produktu¹⁶ i procesu¹⁷. Analiza wskaźnikowa w połączeniu ze wskaźnikowymi systemami ostrzegania obecnymi w nowszych systemach filtracji¹⁸ pomimo swoich wad pozwala w sposób ograniczony na wykonywanie prostej kontroli procesu w celu eliminacji występowania błędów i zapobiegania zanieczyszczeniom systemów dystrybucji. Monitoring procesu zorientowano na pomiar wartości wejściowych¹⁹ i procesowych²⁰, które już na etapie produkcji zapobiegają materializacji ryzyka wynikającego z wystąpienia potencjalnych defektów.

Monitorując²¹ dotychczas²² parametr wyjściowy *post factum*, wielokrotnie zidentyfikowano zanieczyszczenia systemów dystrybucji. Bariery w implementacji takich rozwiązań były ograniczenia wynikające z technicznych możliwości prowadzenia takiego monitoringu. Obecnie na rynku pojawiły się specjalizowane systemy pomiarowe, które można w tym celu wykorzystać, ale ze względu na ich koszt zdecydowano się na ich zastosowanie w eksploatacji systemów produkcji powietrza oddechowego o dużej wydajności, zaopatrujących kluczowe z punktu widzenia bezpieczeństwa systemy dystrybucji. Dotychczas w przypadku wyłączenia systemu sprężania z eksploatacji np. z powodów przekroczenia wartości progowych ditlenku węgla użytkownik po naprawie systemu wykonywał samodzielne pomiary eksploatacyjne z użyciem analizatorów przenośnych lub innych urządzeń wskaźnikowych, które były podstawą do skierowania próbki kontrolnej do dalszych badań laboratoryjnych.

Dopiero po weryfikacji laboratoryjnej zezwalano na ponowne uruchomienie systemu. Wprowadzenie adekwatnych systemów pomiarowych monitoringu procesu pozwoli zapobiegać występowaniu wad zapobiegając tym samym kosztownym wyłączeniem systemu sprężania z eksploatacji. Ponadto ograniczy to koszty wykonywania po kontrolnych analizach laboratoryjnych, zapewni odpowiednią klauzulę jakościową w okresach pomiędzy wykonywaniem wymaganych laboratoryjnych badań okresowych²³ oraz zapobiegnie zanieczyszczeniu²⁴ systemów dystrybucji czy też przedostaniu się materiałów eksploatacyjnych²⁵ do systemów magazynowych.

Co istotne, zapobiegnie zanieczyszczeniom spowodowanym niespodziewanym, przedterminowym skróceniu żywotności filtrów które powoduje zwiększenie emisji zanieczyszczeń, nie tylko uniemożliwiając eksploatację powietrza w hiperbarycznych warunkach tlenowych, lecz także powodując zabrudzenie systemów magazynowania i dystrybucji, które później trzeba czyścić przed ich powtórny dopuszczeniem na hiperbaryczne warunki tlenowe. Powyższa sytuacja w dotychczasowych warunkach eksploatacyjnych, ze względu na brak adekwatnych systemów zabezpieczeń promowała nieświadomą eksploatację niesprawnego systemu produkcyjnego, do czasu wykonania badań okresowych lub fakultatywnego sprawdzenia jakości czynnika oddechowego wykonanego przez operatora systemu²⁶ za pomocą analizatorów przenośnych.

Nawet zastosowanie w części nowych zestawów systemu filtrów wskaźników poziomu zużycia, np. systemu kontroli *SECURUS*²⁷, który poprzez wyświetlenie odpowiedniego sygnału wizualnego informuje obsługę o stopniu nasycenia wkładów filtrujących nie kompensowało istniejącego zagrożenia. Zgromadzone wyniki pomiarów próbek kontrolnych eksploatowanych systemów hiperbarycznych pokazały zanieczyszczenie systemów magazynowych i dystrybucji [4], które mogło nastąpić w wyniku przebicia wkładów filtrujących przed upływem teoretycznego czasu eksploatacji lub wadliwie przygotowanych zbiorników magazynowych, błędów obsługi, nieprzestrzegania *SOP* itp. Zastosowanie w takim przypadku wskaźnika alarmowego w systemach sprężania i filtracji zapobiegłoby zanieczyszczeniu instalacji okrętowej.

CEL PRACY

Jak pokazała analiza kontekstu²⁸ sytuacji problemowej związanej z procesem dobór wiarygodnego i adekwatnego systemu monitorowania i nadzoru zniweluje występowanie części zidentyfikowanych zagrożeń, tym samym zwiększając odporność systemów sprężania i uzdatniania powietrza oddechowego na występowanie awarii. Pomimo tego, że wykonywane pomiary stanowiskowe²⁹ są mniej dokładne niż laboratoryjne przyjęto założenie, że po spełnieniu odpowiednich warunków metrologicznych i walidacji³⁰ systemu pomiarowego w warunkach eksploatacyjnych zostaną one zaakceptowane jako dostatecznie wiarygodne do nadzorowania i wnioskowania w zakresie racjonalizowanego procesu.

Biorąc pod uwagę charakter nadzorowanego procesu oraz minimalizacji popełnienia błędów pomiaru wykonanych przez operatora przyjęto założenie realizacji nadzoru eksploatacyjnego w formie monitoringu realizowanego w sposób automatyczny bez udziału operatora³¹. Założono stałą możliwość gromadzenia danych pomiarowych z określoną częstotliwością próbkowania. Ustalono, że dane pomiarowe zawartości ditlenku węgla będą analizowane za pomocą kart kontrolnych³² i archiwizowane³³. Metody opracowania i doboru kart do racjonalizowania danego procesu zostały pominięte, gdyż zostały już opisane [5,6]. System kontroli sygnalizacji wskaźnikowej zaprojektowano w taki sposób aby zapobiegać przekroczeniu ustalonych granic kontrolnych procesu, tym samym zapobiegając zanieczyszczeniu systemu dystrybucji czynnika oddechowego w *ZTPP AMW* przeznaczonego do zasilania *DGKN – 120*. Głównym zadaniem wytypowanego do badań przyrządu pomiarowego jest weryfikacja jego poprawności funkcjonalnej oraz ocena jego metrologicznych cech jakościowych [5] dla nadzorowania racjonalizowanego³⁴ procesu produkcyjnego.

BADANIA, MATERIAŁ I METODY

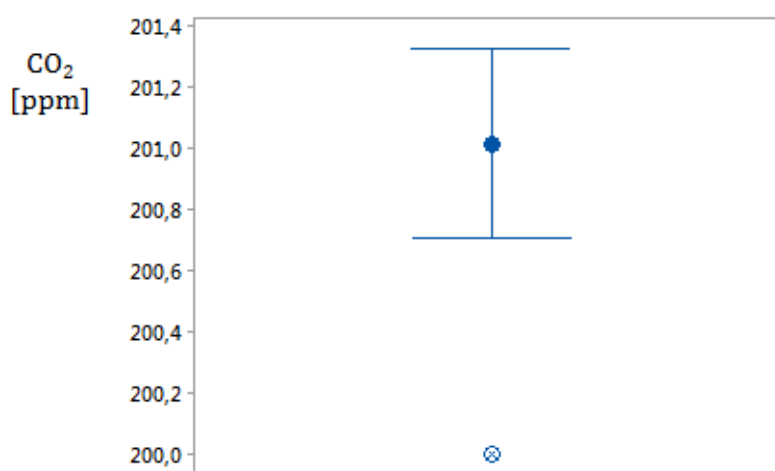
Ocenę wytypowanego do badań systemu pomiarowego *CCS*³⁵ przeznaczonego do kontroli zawartości ditlenku węgla wykonano dla systemu zasilania sprężonym powietrzem kompleksu *DGKN – 120*³⁶ w *KTPP AMW*³⁷. Zgodnie z zasadami sterowania jakością należało dokonać walidacji wytypowanego do badań systemu pomiarowego³⁸. Ocenę własności metrologicznych systemu przeprowadzono w celu jego kwalifikacji do nadzorowania procesu produkcji powietrza oddechowego dla nurków. W tab. 1 przedstawiono podstawowe statystyki opisowe.

Statystyka opisowa dla sensora ditlenku węgla systemu pomiarowego CCS.

Statystyka	Wartość pomiaru	Jednostka
Liczba ważnych pomiarów	360	-
Średnia	201.02	ppm
Błąd standardowy średniej	0.16	ppm
Odchylenie standardowe	3.00	ppm
Moda	200	ppm
Minimum	194	ppm
Maksimum	208	ppm
Mediana	200	ppm
Skośność	0.17	-
Kurtoza	-0.56	-
Pierwszy kwartyl Q1	199	ppm
Trzeci kwartyl Q3	203	ppm
Współczynnik zmienności	1.49	%

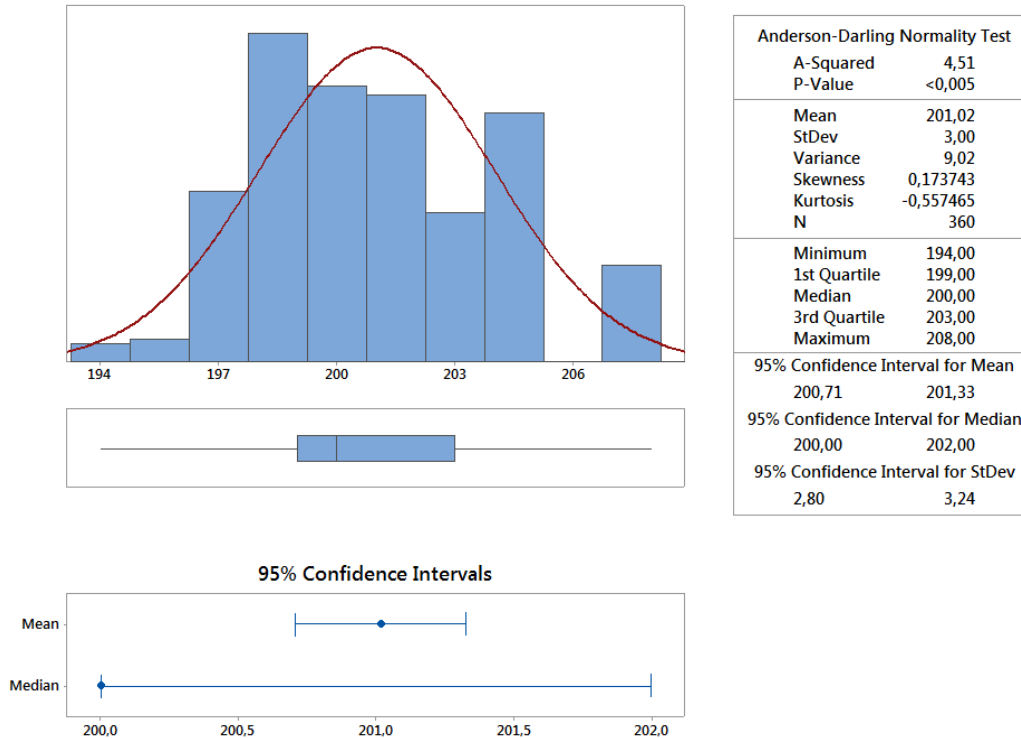
Do identyfikacji występowania pomiarów odstających (izolowanych)³⁹ w grupie $n = 360$ wykonanych pomiarów zastosowano *Test Grubbsa*. Dokonano weryfikacji hipotezy zerowej H_0 - wszystkie wyniki pomiarów pochodzą z tej samej populacji o rozkładzie normalnym względem hipotezy alternatywnej H_1 - najmniejsza/największa wartość jest wynikiem odstającym. Obliczona wartość funkcji testowej $G = 2,34^{40}$, ($p - value = 1$). Zatem na poziomie istotności $\alpha = 0,05$ nie ma podstaw do odrzucenia hipotezy H_0^{41} .

Poniżej przedstawiono maksymalny bezwzględny błąd oceny stanowiący połowę szerokości przedziału ufności dla poziomu $(1 - \alpha = 0,95)$ rys. 1.



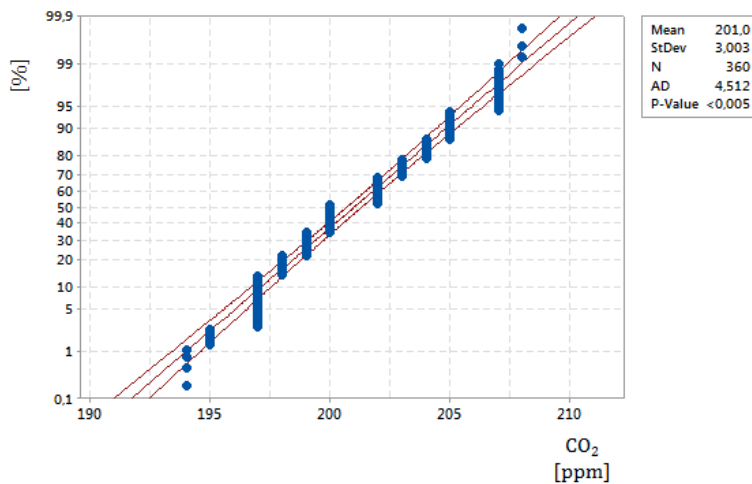
Rys. 1 Średnia $\bar{x} \pm \Delta x (1 - \alpha = 0,95) = 201,02 \pm 0,30 \text{ ppm}$ dla pomiarów etalonu CO_2 . Źródło: badania własne.

Obliczona wartość średnia pomiaru $\bar{x} = 201,02 \text{ ppm}$ jest bardzo zbliżona do wartości nominalnej. Moda wynosi $C_{CO_2} = 200 \text{ ppm}$, odpowiada to wartości referencyjnej zastosowanego etalonu. Skośność $SK = 0,17 > 0$ i wartość kurtozy $KU = -0,55$ nie świadczą o istotnych odstępstwach od rozkładu normalnego. Mediana odpowiada wartości mody (dominandy). Rozkład empiryczny danych pomiarowych etalonu wraz z przedziałami ufności dla \bar{x} i Me oraz $n = 360$ przedstawiono na rys. 2.



Rys. 2 Rozkład empiryczny i teoretyczny danych pomiarowych wraz z przedziałami ufności dla średniej i mediany ($1 - \alpha = 0,95$). Źródło: badania własne.

Graficzny test normalności dla wyników pomiaru potwierdza zgodność z rozkładem normalnym⁴² rys. 3. Przedstawiony tzw. „sklasterowany”⁴³ układ punktów jest charakterystyczny dla systemów pomiarowych i wynika z rozdzielczości analizowanego urządzenia pomiarowego. Jest to bezpośrednią przyczyną rozbieżności interpretacyjnej w zakresie uzyskanej wartości p – $value < 0,005$ dla testu $A - D$ (Andersona – Darlinga). Rozkład danych potwierdza spełnienia warunku rozdzielczości wskazując na możliwość rozróżnienia co najmniej 10 stanów zachowania parametru w zakresie jego zmienności.



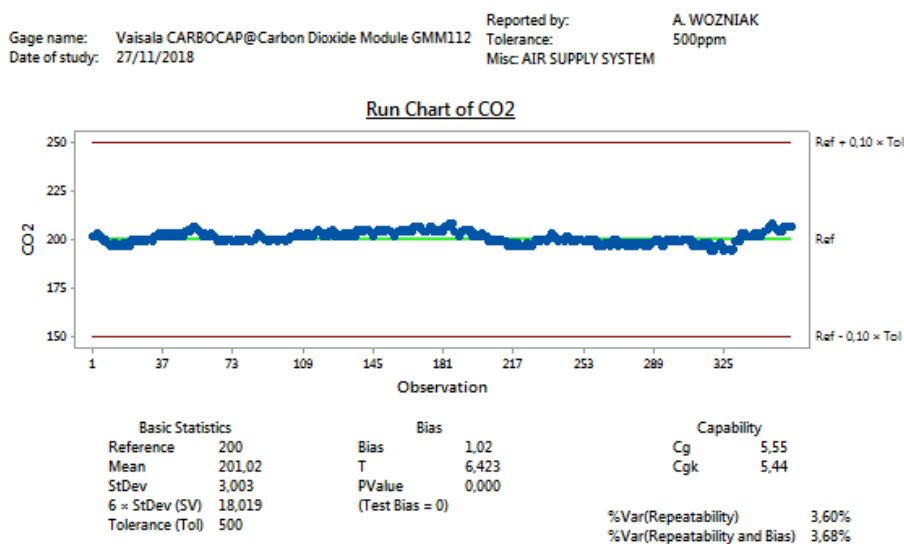
Rys. 3 Graficzny test normalności dla wyników pomiaru etalonu. Źródło: badania własne.

Na rys. 4 przedstawiono wykres przebiegu procesu pomiarowego (ang. run chart) względem wartości nominalnej etalonu $x_{wz} = 200ppm \pm 1ppm CO_2$. Wstępną analizę stabilności i zdolności systemu pomiarowego do nadzorowania procesu produkcji powietrza oddechowego na hiperbaryczne warunki tlenowe⁴⁴ przeprowadzono z zastosowaniem Procedury 1 MSA⁴⁵ [7]. W ramach procedury oszacowano niepewności pomiaru, obliczono wskaźniki zdolności systemu pomiarowego C_g i C_{gk} i oszacowano występowanie błędów systematycznych. Zgodnie z wymaganiami [8] wyznaczone granice tolerancji procesu produkcyjnego dla CO_2 wynoszą odpowiednio $USL = 500ppm$ ⁴⁶ oraz $LSL = 0 ppm$ ⁴⁷. Zdefiniowano je jako krytyczne dla nadzorowania jakości kontrolowanego procesu (CTQ ⁴⁸). Dolną granicę wymagań dla procesu wyznaczoną przez dolny limit specyfikacji $LSL = 0$ należy traktować jako naturalną, gdyż w każdym przypadku zawartość ditlenku węgla w próbce kontrolnej przyjmie wartość $C_{CO_2} \geq 0$.

Proces produkcji powietrza oddechowego oraz zachodzące w nim podprocesy uzdatniania i filtracji czynnika oddechowego powinny zapewnić zawartość normowanych zanieczyszczeń niższą niż wartość krytyczna⁴⁹. Zastosowanie powyższej procedury oceny systemu pomiarowego jest podyktowane koniecznością dokonania wstępnej oceny zautomatyzowanego systemu pomiarowego przed jego zastosowaniem do nadzorowania linii produkcyjnej. Przeprowadzona ocena będzie stanowić podstawę do kwalifikacji urządzenia do nadzorowania procesu i dalszego wnioskowania w zakresie oceny stabilności⁵⁰ urządzenia pomiarowego w czasie.

W celu oceny zdolności procesu pomiarowego do spełnienia krytycznych wymagań jakościowych CTQ zastosowano wskaźniki zdolności urządzenia pomiarowego C_g ⁵¹ oraz C_{gk} ⁵². W przypadku oceny zdolności procesu do wypełnienia krytycznych wymagań jakościowych CTQ rzeczywiste wskaźniki powinny być większe $C_g, C_{gk} > 1,33$ ⁵³. Analizowanie wskaźników daje możliwość identyfikacji występowania zakłóceń deterministycznych, które powodują niestabilność procesu pomiarowego. Wskaźnik rozrzutu systemu pomiarowego C_g wyrażający potencjalną zdolność urządzenia pomiarowego do wypełnienia krytycznych wymagań jakościowych CTQ obliczono z zależności: $C_g = \frac{k/100 \cdot T}{6 \cdot s_g}$ gdzie: $k \in [10 \div 20]$, s_g – odchylenie standardowe wyników pomiarów⁵⁴, T – tolerancja procesu. Wskaźnik wycentrowania C_{gk} wskazujący zdolność rzeczywistą procesu, uwzględniający jego aktualne wypośrodkowanie i rozrzut obliczono z zależności: $C_{gk} = \frac{(\frac{k}{200} \cdot T) - |\bar{x} - x_{wz}|}{3 \cdot s_g}$, gdzie \bar{x} – wartość średnia procesu, x_{wz} – wartość referencyjna wzorca. Wynika z tego, że wskaźniki odnoszone są do granic $k = 0,1 \div 0,2, T = 0,1 \div 0,2(USL - LSL)$.

W rozpatrywanym przypadku dla $k = 0,1$ ⁵⁵ obliczone $C_g = 5,55$ i $C_{gk} = 5,45$. Przyjmują one zatem wartości $C_g, C_{gk} > 1,33$. Wynika stąd, że rozpatrywane urządzenie pomiarowe jest zdolne a zmienność procesu pomiarowego jest mała względem przyjętych granic tolerancji. Wartość współczynnika C_g wskazuje, że zmienność całkowita urządzenia pomiarowego mieści się 5,55 razy w zakresie określonym przez granice $0,1 T$ tolerancji procesu, rys. 5.



Rys. 4 Procedura oceny zdolności systemu pomiarowego (MSA) ditenku węgla z wykorzystaniem pomiarów etalonu $CO_2 = 200ppm$ oraz linii kontrolnych $LCL = 150$ i $UCL = 250 ppm$ nadzorowanego procesu na poziomie $(0,1 \cdot T)$ ⁵⁶. Źródło: badania własne.

W celu identyfikacji występującego błędu systematycznego⁵⁷ dla oceny dokładności⁵⁸ metody pomiarowej dokonano porównania \bar{x} pomiarowych danych empirycznych z wartością x_{wz} wzorca⁵⁹. Poddano weryfikacji hipotezę $H_0: bias = 0$ wobec alternatywnej $H_1: bias \neq 0$, gdzie $bias = \bar{x} - x_{wz}$. Obliczona wartość statystyki testowej t jest większa od wartości krytycznej t_{kr} odpowiadającej poziomowi istotności $\alpha = 0,05$ ($t = 6,423 > t_{kr} = 1,968$), $p - value = 0$ należy zatem odrzucić hipotezę H_0 na rzecz alternatywnej H_1 uznając, że pomiar jest obciążony występowaniem stałego istotnego statystycznie błędu systematycznego $bias = 1,02 ppm$, rys. 4. Zazwyczaj w przypadku występowania błędu systematycznego należy dokonać jego korekcji poprzez wykonanie wzorcowania (kalibracji) systemu pomiarowego.

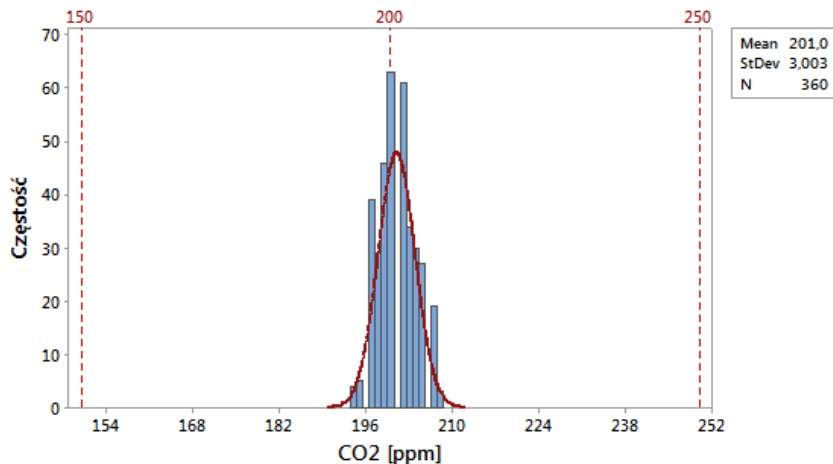
Otrzymany błąd wyniku pomiaru wynikający z jego składowej systematycznej jest znikomy ($bias \approx 1 ppm$) względem zdefiniowanych granic tolerancji procesu oraz deklarowanej przez producenta zmienności pomiarowej systemu⁶⁰. Występujące oddziaływanie systematyczne można pominąć, gdyż jest ono równe rozdzielczości⁶¹ systemu pomiarowego. Potwierdza to również porównanie \bar{x} z wartością odniesienia x_{wz} z uwzględnieniem wartości niepewności⁶² ich wyznaczenia, spełnienie zależności $|\bar{x} - x_{wz}| < 2 \sqrt{u^2_{\bar{x}} + u^2_{x_{wz}}} = 1,02 < 1,16$ wskazuje, że uzyskana \bar{x} jest zgodna z wartością odniesienia x_{wz} ⁶³ [8].

Obliczona wartość procentowej zmienności dla powtarzalności⁶⁴ wynosi $\%Var(Rep) = 3,60\%$ rys. 4. Jest ona zdeterminowana wartością obliczonego współczynnika zdolności C_g natomiast wartość procentowa od powtarzalności i błędu systematycznego⁶⁵ $\%Var(Rep and Bias) = 3,68\%$ wynika ze współczynnika położenia C_{gk} .

Obie z wymienionych wartości zarówno pochodzące od powtarzalności i błędu systematycznego nie powinny przekraczać $> 15\%$ ⁶⁶. Otrzymane wartości są mniejsze niż wartość krytyczna należy zatem przyjąć, że zmienność przyrządu pomiarowego jest niewielka. Ewentualne przekroczenie wartości krytycznej sugeruje nadmierną zmienność pomiarową

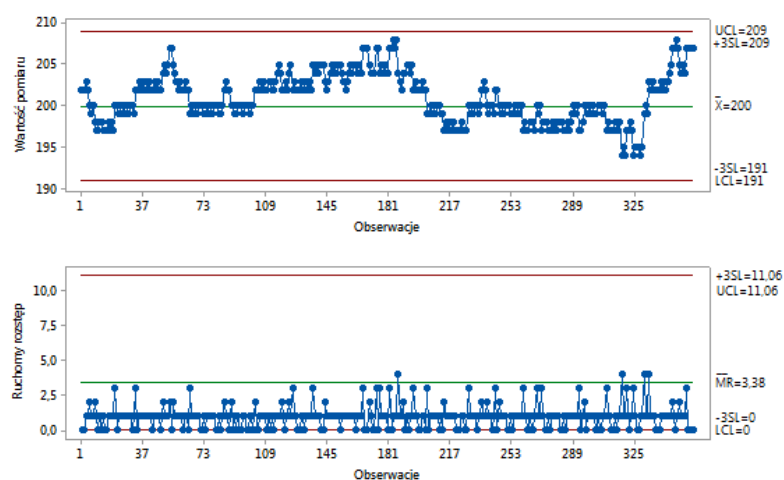
przrządu. Taka sytuacja może prowadzić do eliminacji urządzenia ze względu na brak wystarczającej powtarzalności i/lub zbyt duży wpływ błędu systematycznego na wykonywany pomiar. Z tego względu należy zidentyfikować możliwą przyczynę/y deterministyczne nadmiernej zmienności a system poddać urządzenie wzorcowaniu i ponownej walidacji przed dopuszczeniem do wykonywania pomiarów kontrolnych na linii produkcyjnej. Jeżeli $bias \neq 0$ należy poszukiwać prawdopodobnych przyczyn zjawiska, które może być spowodowane występowaniem np. błędu wartości referencyjnej, nadmiernego zużycia przyrządu pomiarowego⁶⁷ itp.

Inną przyczyną może być nieprawidłowe wykonanie procedury kalibracji lub niewłaściwa obsługa systemu przez operatora⁶⁸. Należy również rozważyć przypadek zastosowania nieprawidłowego algorytmu korekcji przyrządu. Nadrzędnym celem prowadzonej weryfikacji jest identyfikacja przyczyn i zakłóceń procesu pomiarowego w celu ich eliminacji a następnie odtworzenia zdolności pomiarowej. Jak wiadomo rozróżnialność systemu pomiarowego powinna pozwalać na identyfikację⁶⁹ jego zmienności oraz przyczyn specjalnych (szczególnych) ją wywołujących. Rozkład danych pomiarowych względem wartości nominalnej na tle przedziału tolerancji T przedstawiono na rys. 5.



Rys. 5 Zmienność systemu pomiarowego ditlenku węgla na tle $(0,1 \cdot T)$ przedziału tolerancji procesu ($LCL = 150$, $UCL = 250$ ppm, $x_{wz} = 200$ ppm, $\bar{x} = 201$ ppm). Źródło: badania własne.

Dla procesu pomiarowego analogicznie jak dla procesu produkcyjnego można opracować kartę kontrolną [6]. Karta w przypadku monitoringu *online* może być narzędziem kontrolnym do oceny stabilności procesu pomiarowego. Do analizy można wykorzystać opracowaną w sposób projektowy⁷⁰ dla wartości nominalnej $x_{wz} = 200$ ppm⁷¹ oraz odchylenia standardowego $\sigma = 3$ ppm kartę kontrolną pojedynczych obserwacji i ruchomego rozstępu $I - MR$ rys. 6. Na karcie I wartości indywidualnych jak i ruchomego rozstępu MR ⁷² nie pojawiają się punkty znajdujące się poza ustalonymi liniami kontrolnymi LCL ⁷³ i UCL ⁷⁴. Pomimo występujących trendów wskazujących na okresowe przesunięcie procesu oraz jego zmianę w położeniu i rozrzucie względem linii centralnej należy uznać, że jest on stabilny a wpływy wynikają z naturalnej zmienności badanego systemu pomiarowego.



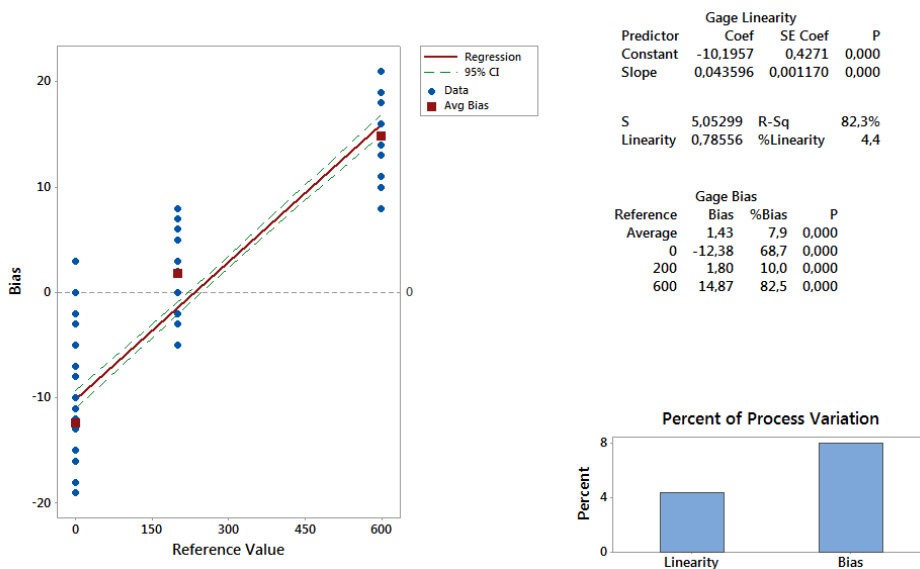
Rys. 6 Karta kontrolna $I - MR$ do nadzorowania stabilności systemu pomiarowego. Źródło: badania własne.

Mając na uwadze wstępne oszacowanie błędu systematycznego dla etalonu $CO_2 = 200$ ppm w celu zbadania liniowości wskazań oraz oszacowania wartości błędu systematycznego w zdefiniowanym zakresie pomiarowym $(0 - 700$ ppm)⁷⁵ przeprowadzono badanie⁷⁶ z użyciem trzech wzorców odpowiednio o zawartościach: $x_{wz1} = 0$ ppm CO_2 , $x_{wz2} = 200$ ppm CO_2 , $x_{wz3} = 600$ ppm CO_2 .

Dokonano porównania uzyskanych wartości średnich \bar{x} pomiarów z każdą wartością odniesienia x_{wz} .

W celu zidentyfikowania różnic pomiędzy występującymi błędami systematycznymi w zależności od miejsca wykonywanego pomiaru w zakresie pomiarowym systemu pomiarowego dokonano weryfikacji jego liniowości. Szczegółową analizę liniowości systemu pomiarowego wraz z oszacowaniem błędu systematycznego przedstawiono⁷⁷ na rys. 7. Udział procentowy liniowości dla systemu pomiarowego wynosi 4,4% całkowitej zmienności procesu a wartość średniego błędu systematycznego wynosi 7,9% od średniej zmienności procesu co odpowiada wartości pomiaru $\bar{bias} = 1,43 \text{ ppm}$ ⁷⁸.

W wartościach granicznych odpowiednio $0 \div 600 \text{ ppm}$ występuje względnie duży błąd systematyczny od $-12,38 \text{ ppm}$ ⁷⁹ do $14,87 \text{ ppm}$ ⁸⁰. Najmniejszą wartość błędu systematycznego obserwujemy dla wzorca 200 ppm, $bias = 1,8 \text{ ppm}$. Za miarę mocy zależności liniowej przyjęto współczynnik determinacji odpowiadający w tym przypadku kwadratowi współczynnika korelacji *Pearsona* $r^2 = 82,3\%$. Współczynnik kierunkowy⁸¹ prostej wynosi 0,0435. Prosta regresji opisana jest równaniem $y = -10,195 + 0,0435 \cdot x_{wz}$. Wartość p -value = 0 wskazuje na istotność statystyczną współczynnika kierunkowego⁸² zatem obserwowana liniowość jest istotna statystycznie.



Rys. 7 Analiza liniowości oraz błędu systematycznego systemu pomiarowego. Źródło: badania własne.

Jeżeli system pomiarowy nie wykazywałby istotnej liniowości, należałoby go ponownie skalibrować osiągnąć wartość zerową $bias$ poprzez odpowiednią modyfikację systemu pomiarowego, oprogramowania lub wykonanie obu wymienionych czynności. Jeśli występujące odchylenie nie może być dostosowane do zerowego obciążenia błędem systematycznym w całym zakresie pomiarowym, to mimo tego system ten w sposób świadomy nadal może być używany do kontroli produktu/procesu.

OCENA POWTARZALNOŚCI

Po oszacowaniu poprawności systemu pomiarowego⁸³ polegającej na ocenie występowania błędu systematycznego i liniowości oszacowano zmienność systemu pomiarowego $\%GRR$ oraz dokonano oceny powtarzalności jako składowej precyzji bez udziału odtwarzalności⁸⁴ systemu pomiarowego za pomocą jednoczynnikowej analizy wariancji ANOVA typu *crossed*⁸⁵ [9]. Kwalifikację systemu pomiarowego przeprowadzono względem wyznaczonych granic specyfikacji analizowanego procesu. Należy przyjąć założenie, że za nadzorowanym procesem musi podążać zdatny system pomiarowy o potwierdzonych cechach metrologicznych. O przydatności systemów pomiarowych do nadzorowania i doskonalenia procesów decydują ich własności statystyczne. Dlatego dla właściwego sterowania procesem zmienność systemu pomiarowego powinna być mała w porównaniu do jego zmienności całkowitej⁸⁶ a system pomiarowy powinien znajdować się pod kontrolą statystyczną.

Analizę⁸⁷ powtarzalności dla systemu wykonano na podstawie wielokrotnego pomiaru wartości referencyjnych⁸⁸ dla przyjętej szerokość zakresu specyfikacji nadzorowanego procesu ($T = 0 \div 500 \text{ pmm}$). Zmienność całkowita jest sumą $TV^{89} = PV + GRR$, gdzie PV – zmienność procesu a GRR – to zmienność pochodząca od system pomiarowego.

Ze względu na system zautomatyzowany hipoteza H_0 – nie istnieje różnica pomiędzy operatorami nie będzie testowana (gdyż wpływ operatora na wynik pomiaru nie istnieje). Poddane weryfikacji zostanie hipoteza H_0 – twierdząca, że nie istnieje różnica pomiędzy częściami. Na rys. 8 przedstawiono wyniki jednoczynnikowej analizy wariancji ANOVA.

One-Way ANOVA Table

Source	DF	SS	MS	F	P
PART	2	20331415	10165708	508382	0,000
Repeatability	297	5939	20		
Total	299	20337354			

α to remove interaction term = 0,05

Gage R&R

Source	VarComp	%Contribution (of VarComp)
Total Gage R&R	20	0,02
Repeatability	20	0,02
Part-To-Part	101657	99,98
Total Variation	101677	100,00

Process tolerance = 500

Source	StdDev (SD)	Study Var (6 × SD)	%Study Var (%SV)	%Tolerance (SV/Toler)
Total Gage R&R	4,472	26,83	1,40	5,37
Repeatability	4,472	26,83	1,40	5,37
Part-To-Part	318,837	1913,02	99,99	382,60
Total Variation	318,868	1913,21	100,00	382,64

Number of Distinct Categories = 100

Rys. 8 Analiza wariancji ANOVA zmienności procesu pomiarowego na tle przedziału tolerancji $T = 0 \div 500ppm$ nadzorowanego procesu dla $n = 100$ pomiarów i 3 części bez udziału operatora. Źródło: badania własne.

Analiza dla przyjętego $\alpha = 0,05$ wskazuje, że ze względu na otrzymaną wartość p – value = $0 < 0,05$ testowaną hipotezę H_0 należy odrzucić i przyjąć, że na tle zmienności analizowanego systemu pomiarowego widoczna jest zmienność w zdefiniowanym zakresie specyfikacji (tzn. istnieje istotna różnica pomiędzy częściami⁹⁰). Oznacza to, że ze względu na powtarzalność⁹¹ jesteśmy w stanie za pomocą systemu pomiarowego zidentyfikować zmienność nadzorowanego procesu. Uwzględniając procentowy udział poszczególnych zmienności do zmienności całkowitej z otrzymanej tabeli ANOVA rys. 8 wynika⁹², że udział zmienności pochodzącej od części⁹³ jest znacznie większy niż zmienność całkowita systemu pomiarowego⁹⁴.

Wynika z tego, że prawie cała obserwowana zmienność pochodzi od występujących różnic pomiędzy częściami (wzorcami) a nie od systemu pomiarowego. Jak wiadomo obliczona zmienność systemu pomiarowego $GRR = 26,83$ w rozpatrywanym przypadku pochodzi całkowicie od składowej powtarzalności. Zmienność systemu pomiarowego GRR należy odnieść do zmienności całkowitej $TV = 1913,21$ spełniając warunek adekwatności $\frac{GRR}{TV} < 10\%$ gdyż obliczony $\%SV(\%GRR) = \frac{GRR}{TV} \cdot 100\% = 1,4\% < 10\%$.

Wnioskujemy zatem, że system ze względu na jego powtarzalność jest zdalny bez ograniczeń do nadzorowania omawianego procesu. W odniesieniu do nadzorowania produktu dla zadeklarowanych granic specyfikacji $T = 0 \div 500ppm$ urządzenie pomiarowe może być zastosowany bez ograniczeń gdyż: $SV/T = \frac{GRR}{T} \cdot 100\% = 5,37\% < 10\%$. Rozróżnialność systemu pomiarowego należy postrzegać jako liczbę rozróżnialnych kategorii $ndc^{95} = \sqrt{2 \cdot \left[\left(\frac{100}{\%GRR} \right)^2 - 1 \right]} \approx 100^96 \gg 14$. System pomiarowy spełnia warunek adekwatności⁹⁷ gdyż rozróżnia około 100 „stanów” z zakresu specyfikacji⁹⁸ jednocześnie informując nas ile razy zmienność systemu pomiarowego jest mniejsza od zmienności procesu.

Do ustalenia, czy system pomiarowy jest zdolny, stosuje się również alternatywne kryterium [10] oparte na współczynniku precyzji⁹⁹ do tolerancji (PTR^{100}).

Dla badanego systemu pomiarowego $PTR = \frac{k \cdot \sqrt{\sigma^2_{m^i}}}{(USL-LSL)} = \frac{6 \cdot s^{ii}}{(USL-LSL)} = 0,053$, dla $k = 6^{103}$. Zatem przy $PTR = 0,053 < 0,1$ system należy uważać za zdalny gdyż zaleca się następującą zasadę stosowania PTR :

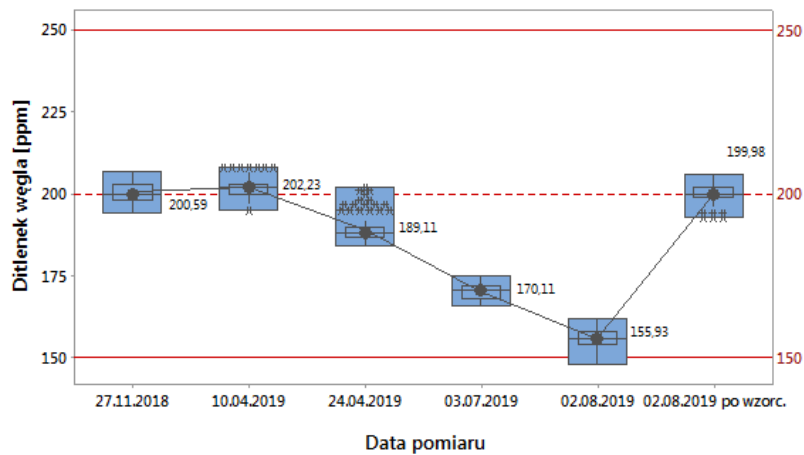
- $PTR < 0,1$: system pomiarowy jest zdalny,
- $0,1 < PTR < 0,3$: system pomiarowy może być zdalny w zależności od czynników takie jak zdolność procesu i koszty błędnej klasyfikacji,
- $PTR > 0,3$: system pomiarowy nie jest zdalny [10].

Należy zauważyć, że PTR nie zawsze daje prawidłowe oszacowanie jak dobrze działa system pomiarowy dla analizowanego procesu. Dzieje się tak, ponieważ proces o wysokiej zdolności może tolerować system pomiarowy z wyższą wartością współczynnika PTR [10]. Z tego powodu zdolność systemu pomiarowego jest często określane przez funkcje współczynnika $\sigma^2_r = \frac{\sigma^2_{p \cdot 10^4}}{\sigma^2_m}$ określającego stosunek wariancji systemu pomiarowego do wariancji procesu. Stosunek sygnału

do szumu (SNR)¹⁰⁵ jest funkcją współczynnika σ^2_r , zdefiniowaną jako: $SNR = \sqrt{2 \cdot \sigma^2_r}$. SNR definiuje się jako liczbę odrębnych kategorii¹⁰⁶ które mogą być wiarygodnie rozróżnione przez system pomiarowy. Zaleca się aby wartości wskaźnika przyjmowały wartości ≥ 5 . Wartość $SNR \leq 2$ wskazuje na pomiar wykonywany przez system, który nie posiada żadnej wartości analitycznej [10].

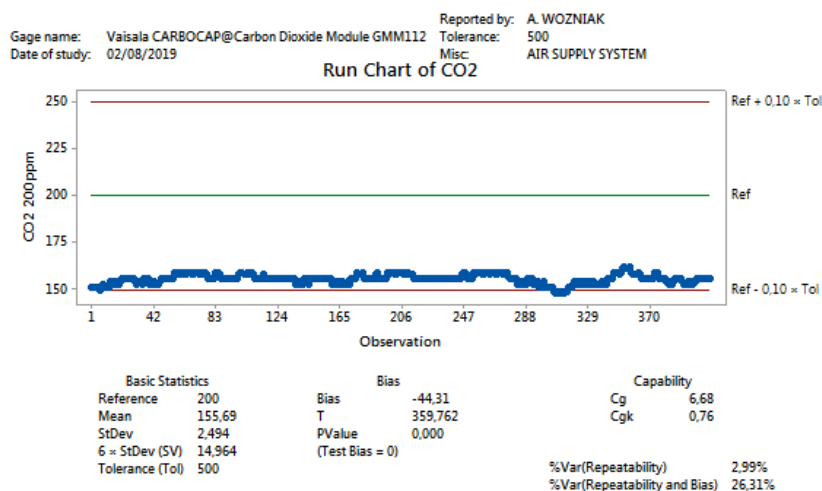
OCENA STABILNOŚCI W CZASIE

Stabilność systemu do utrzymywania stałych w czasie charakterystyk metrologicznych. oceniono na podstawie okresowych pomiarów wartości referencyjnej¹⁰⁷. Stabilność systemu pomiarowego jest miarą różnicy pomiędzy wartością średnią wyników identycznych serii pomiarów \bar{x} do wartości nominalnej etalonu x_{wz} . Pomiary wykonywano w takich samych warunkach, w określonych odstępach czasu [5]. Im mniejsze są zidentyfikowane w czasie różnice $\Delta x_{wz} = x_{wz} - \bar{x}$ tym system będzie bardziej stabilny. Badania systemu przeprowadzono wykonując okresowo pomiar etalonu ditlenku węgla $x_{wz} = 200 \pm 1ppm$. Deklarowana w okresie 5 lat przez dostawcę stabilność dla sensora pomiarowego wynosi $\Delta \pm 5\%$ jego zakresu pomiarowego Z . Należy zatem spodziewać się zmian w zakresie $\Delta x_{wz} \pm 100ppm$. Jak wspomniano na potrzeby nadzorowanego procesu produkcyjnego jako granice specyfikacji przyjęto $USL = 250ppm, LSL = 150ppm$ ($x_{wz} \pm 50ppm = 0,1T$). Są to granice zbliżone dla deklarowanej przez dostawcę dokładności¹⁰⁸ $\Delta x_{wz} \leq 44ppm$ dla odczytu $x_{wz} CO_2 = 200 \pm 1ppm$ i zakresu pomiarowego $Z = 0 \div 2000ppm$.

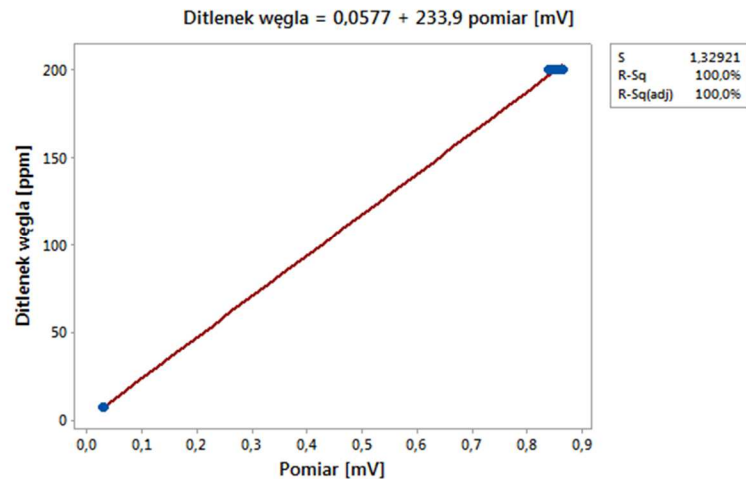


Rys. 9 Średnia $\bar{x} \pm \Delta x$ ($1 - \alpha = 0,95$) dla pomiarów etalonu ditlenku węgla $x_{wz} = 200 \pm 1ppm$ w czasie. Źródło: badania własne.

W wyniku badań stwierdzono przekroczenie dolnej granicy specyfikacji w dziewiątym miesiącu eksploatacji rys. 9. Ze tego względu wykonano ponowne wzorcowanie urządzenia pomiarowego eliminując zidentyfikowany błąd systematyczny pomiaru rys. 10. Wzorcowania dokonano na podstawie pomiarów napięcia [mV] względem 2 etalonów ditlenku węgla. Wykonano krzywą kalibracyjną rys. 11. Zgodność wyniku pomiaru z materiałem doniesienia po wykonanym wzorcowaniu przedstawiono na rys. 9.



Rys. 10 Procedura oceny zdolności systemu pomiarowego ditlenku węgla przed wzorcowaniem dla etalonu $x_{wz} = 200ppm$ i granic tolerancji $LSL = 150, USL = 250 ppm$. Źródło: badania własne.



Rys. 11 Krzywa kalibracyjna oznaczenia ditlenku węgla na podstawie pomiarów etalonów ditlenku węgla $x_{wz1} = 200\text{ppm}$ oraz $x_{wz2} = 7\text{ppm}$. Źródło: badania własne.

Zidentyfikowane w czasie zmiany stabilności systemu pomiarowego ze względu na charakter nadzorowanego procesu oraz prawidłowego wnioskowania co do jego zmienności wskazują na konieczność wykonywania kontroli metrologicznej systemu pomiarowego nie rzadziej niż co 5 miesięcy eksploatacji urządzenia.

WNIOSKI

Dokładność pomiarów rozważanego urządzenia pomiarowego przy zachowaniu właściwego nadzoru metrologicznego przewyższa znacznie deklarowaną przez producenta¹⁰⁹. Jest ona wystarczająca do wstępnej kwalifikacji urządzenia pomiarowego. Wyznaczone składowe poprawności i precyzji¹¹⁰ wskazują na zdolność systemu do nadzorowania procesu produkcji powietrza oddechowego. Uzyskane wyniki wstępnej oceny urządzenia pomiarowego ditlenku węgla oraz realizowanych wcześniej badań [1] są podstawą do sformułowania dalszych zaleceń dotyczących kontynuowania nadzoru nad procesem otrzymywania powietrza oddechowego.

Ze względu na narastające zanieczyszczenie ditlenkiem węgla powietrza atmosferycznego¹¹¹ oraz obserwowane ograniczenia technologiczne¹¹² stosowanych systemów filtracyjnych w odpowiedzialnych systemach należy rozważyć uzupełnienie 3 miesięcznego laboratoryjnego nadzoru okresowego powietrza oddechowego o wykonywanie badań eksploatacyjnych¹¹³ za pomocą systemów wskaźnikowych w trybie *online*. W uwarunkowaniach *SZ RP* szczególną uwagę należy zwrócić na systemy wysokociśnieniowe wykorzystywane do produkcji mieszanin oddechowych, zaopatrywania systemów podtrzymania życia okrętów podwodnych, ratowniczych i mobilnych kontenerowych systemów zasilania *PZZP*¹¹⁴ [11]. Ma to istotne znaczenie w trakcie ich intensywnej eksploatacji szczególnie w oddaleniu od baz zaopatrywania¹¹⁵. Zabezpieczenie ich funkcjonowania na wypadek nagłej utraty zdolności nadzorowanego procesu może zapobiec zanieczyszczeniu systemów dystrybucji oraz nieświadomemu użyciu zanieczyszczonego czynnika oddechowego do wykonywania prac podwodnych¹¹⁶ lub wentylacji *OP*¹¹⁷. Stosując systemy wskaźnikowe należy objąć je systematycznym nadzorem metrologicznym oraz poddać w trakcie produkcji badaniom okresowym przy wykorzystaniu metod *MSA*. Przed zastosowaniem w warunkach eksploatacyjnych zabezpieczające systemy sensoryczne należy poddać ocenie metrologicznej i badaniom weryfikacyjnym¹¹⁸ w zakresie spełnienia deklarowanych parametrów technicznych.

W przypadku wdrożenia systemów wskaźnikowych w *SZ RP* okresowo należy prowadzić szkolenie uzupełniające dla zmodyfikowanych *SOP*. Systemy monitoringu *online* stanowią idealne narzędzie do weryfikacji procesu produkcji, zapobiegając skutecznie materializacji zagrożeń procesowych poprzez eliminację występowania wad na etapie wytwarzania produktu. Zastosowanie wskaźnikowych systemów sensorycznych do nadzorowania analizowanego procesu:

- niweluje prawdopodobieństwo wyłączenia z eksploatacji systemów sprężania – poprawiają wskaźnik wykorzystania maszyn;
- minimalizuje zagrożenie wstrzymania procesu produkcji i dostawy dla klienta;
- ogranicza koszty wynikające z ponownego usprawnienia i przezbiorzenia systemu sprężania i filtracji;
- eliminuje kosztowe oczyszczanie zabrudzonych systemów dystrybucji;
- zapobiega zanieczyszczeniu mieszanin oddechowych;
- ogranicza koszty wykonania ponownych badań laboratoryjnych¹¹⁹;
- prowadzi do zmniejszenia zapasu magazynowego wkładów filtracyjnych¹²⁰;
- ogranicza koszty magazynowania¹²¹;
- eliminuje błędy i pomyłki operatora;
- zapewnia bieżącą informację diagnostyczną i identyfikację zakłóceń procesu;
- sygnalizuje awarię systemów filtracyjnych (np. w przypadku nagłej utraty właściwości sorpcyjnych);
- pozwala na stałą weryfikację deklarowanych parametrów eksploatacyjnych systemów uzdatniania powietrza oddechowego (czas ochronnego działania, ilość przefiltrowanego powietrza atmosferycznego itp.).

Tym samym stanowi idealne uzupełnienie laboratoryjnych analiz okresowych i wiarygodne źródło informacji dla użytkownika. Przy wprowadzaniu systemów sprężania i filtracji przewidzianych do zastosowania w ramach realizacji nowych projektów, inwestycji oraz budowy nowych okrętów¹²² na etapie projektowania należy dążyć do unifikacji i zastosowania redundantnych systemów pomiarowych wraz z rozbudowanymi układami wskaźnikowymi o potwierdzonej skuteczności¹²³.

Wstępna analiza oraz wykonane w *KTPP AMW* badania demonstratora technologii potwierdzają możliwość spełnienia wymagań [13] *MW RP*¹²⁴ i wskazują, że istnieją możliwości zastosowania własnych konkurencyjnych rozwiązań wskaźnikowych systemów pomiarowych o parametrach nie gorszych i rozwiązaniach funkcjonalnych lepszych niż aktualnie oferowane na rynku. Wykonana analiza *benchmarkingowa* potwierdza mocne strony projektowanego systemu względem produktów konkurencyjnych. Należy zatem rozważyć implementację proponowanych systemów w *MWRP*, szczególnie tam gdzie wydaje się to konieczne ze względów bezpieczeństwa wykonywania prac podwodnych.

Publikując niniejszy materiał chciałbym serdecznie podziękować Panu profesorowi AMW – dr hab. inż. Ryszardowi KŁOSOWI, za możliwość przeprowadzenia badań jakości czynników oddechowych w ramach pracy naukowo-badawczej pk.: Tulipan IV umowa Nr: DOBR-BIO8/09/01/2016, pt.: „Projektowanie dekompresji dla nurkowań *MCM/EOD II*” oraz wyrazić podziękowanie dla Pana dr inż. Andrzeja CZARSKIEGO za okazane wsparcie i pomoc na etapie realizacji badań.

LITERATURA

1. Woźniak A. Analiza procesu otrzymywania powietrza oddechowego do celów hiperbarycznych. Gdynia : PTMiTH, 2017. ISBN 978-83-938-322-4-8;
2. —. Analiza procesu otrzymywania powietrza do celów hiperbarycznych. Polish Hyperbaric Research. 1, 2018, Tom 62, strony 7-32;
3. Sałaciński T. Inżynieria jakości w technikach wytwarzania. Warszawa : Oficyna wydawnicza Politechniki Warszawskiej, 2016. ISBN 978-83-7814-616-2;
4. Woźniak A. Evaluation of the impact of breathing air contamination on safe performance of hyperbatic exposure. IV. Gdynia : Zeszyty Naukowe AMW, 2016. strony 101-111. ISSN 0860-889X;
5. Sałaciński T. SPC. Statystyczne sterowanie procesami produkcji. Warszawa : Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, 2016;
6. Gerber A. Statystyczne sterowanie procesami-doskonalenie jakosci z pakietem Statistica. Kraków : Stat Soft, 2000. ISBN 83-912346-2-2;
7. Automotive Industry Action Group. Measurement System Analysis Reference Manual 4th Edition. brak miejsca : Chrysler Group LLC, Ford Motor Company, and General Motors, 2010;
8. NO-07-A005:2010. Nurkowanie w celach militarnych. Czynniki oddechowe. Klasyfikacja, wymagania i badania. Warszawa : WCNJK;
9. Namieśnik J Konieczka P, Zygmunt B, Bulska E. Ocena i kontrola jakości wyników pomiarów analitycznych. I. Warszawa : Wydawnictwo WNT, 2017. ISBN 978-83-01-19444-4;
10. Czarski A. Statystyczne sterowanie procesem SPC z analiza systemów pomiarowych MSA. Kraków : TQMSOft, 2017. Tom Materiały szkoleniowe;
11. Burdick R.K. Borrow C.M., Montgomery D.C. Design and Analysis of Gauge R&R Studies: Making Decisions with Confidence Intervals in Random and Mixed ANOVA Models. Philadelphia : Society for Industrial and Applied Mathematics, 2005. ISBN 0-89871-588-1;
12. Woźniak A. Koncepcja systemu zaopatrywania tlenem medycznym i powietrzem oddechowym OP typu KOBVEN. Gdynia : DMW, 2003;
13. ADivP-04 (A)(1):2013. Diving Gas Quality (STANAG 1458). Brussels : Nato Standardization Office;
14. PN-EN-12021:2014-08. Sprzęt do oddychania Sprężone gazy do aparatów oddechowych.

dr inż. Arkadiusz Woźniak

Katedra Technologii Prac Podwodnych
Akademia Marynarki Wojennej w Gdyni
ul. Śmidowicza 69
81-103 Gdynia
tel. 261262746
ar.wozniak@amw.gdynia.pl

¹ ang. Critical to Quality,

² np. zestaw pomiarowy *ACG Analox* lub inne,

³ ang. CCS - Carbon Dioxide Control System,

⁴ Zakład Technologii Prac Podwodnych AMW,

⁵ doświadczalny głębokowodny system hiperbaryczny,

⁶ ang. Measurement System Analysis,

⁶ Measurement System Analysis,

⁷ Statistical Process Control,

⁹ zasysanego powietrza atmosferycznego,

¹⁰ wynikających z wymagań NO-07-A005:2010 oraz *Stanag 1458*,

¹¹ np. zestaw pomiarowy *ACG Analox* lub inne,

¹² FMEA ang. Failure Mode and Effects Analysis,

¹³ jak *poka-yoke*,

¹⁴ elementy wykonawcze,

¹⁵ zdolność oznacza spełnienie przez system pomiarowych następujących cech jakościowych: rozdzielczość, niepewność, dokładność, powtarzalność, odtwarzalność, powtarzalność i stabilność w czasie,

¹⁶ procesy pomiarowe muszą być metrologicznie potwierdzone,

¹⁷ ten powinien być uregulowany, tj. stabilny, wycentrowany i pod kontrolą, jeśli spełnione zostaną krytyczne wymagania jakościowe *CTQ* wynikające z NO-07-A005:2010,

¹⁸ np. *SECURUS*,

¹⁹ zawartość ditlenku węgla w atmosferze czepni powietrza oddechowego do systemów sprężania. Dotychczas nie montowano stałego monitoringu parametrów powietrza ani w czepni powietrza atmosferycznego, ani na wylocie układu filtracji,

²⁰ zawartość ditlenku węgla za systemem uzdatniania powietrza oddechowego na wejściu do systemu dystrybucji czynnika oddechowego,

²¹ na podstawie dotychczasowych doświadczeń zmian *SOP* zalecając użycie systemów wskaźnikowych do prowadzenia pomiarów eksploatacyjnych,

²² za pomocą badań okresowych wykonywanych zgodnie z *GLP* w laboratorium fizykochemicznym gazów oddechowych w czasie nie krótszym niż trzy miesiące przy planowanej pracy systemu w czasie $\tau \leq 50$ roboczogodzin. Potwierdzono, że system kwartalny zbierania danych jest wystarczający do monitorowania procesu produkcji powietrza oddechowego, jeśli eksploatacja urządzenia ma charakter okresowy, a sumaryczny czas pracy sprężarki wynosi $t \leq 50$ godz.,

²³ obserwowano uszkodzenia systemów sprężania a w konsekwencji zanieczyszczenia systemów dystrybucji,

²⁴ do powietrza oddechowego powoduje nie tylko brak możliwości jego użycia, lecz także konieczność powtórnego kosztownego przygotowania tych systemów na warunki tenowe,

²⁵ przede wszystkim smarów i par olejów,

²⁶ zgodnie z *SOP*,

- ²⁷ element wykonawczy ma trzy stany pracy informujące o jakości pracy filtra, a w przypadku przekroczenia dopuszczalnego stopnia nasycenia wkładu filtrującego następuje automatyczne unieruchomienie sprężarki zasilającej, tylko w zakresie przekroczenia wybranych zanieczyszczeń powietrza oddechowego. W trakcie badań pomimo prawidłowej sygnalizacji systemu wykazano przekroczenia granic tolerancji nadzorowanego procesu w zakresie przekroczenia zanieczyszczeń krytycznych w zakresie ditlenku węgla,
- ²⁸ kontekst rozumiany jest tutaj jako otoczenie systemowe, czyli nadsystem do systemu utrzymywania powietrza oddechowego,
- ²⁹ ze względu na posiadane cechy metrologiczne,
- ³⁰ uzyskanie potwierdzenia, że niepewność wyniku pomiaru jest możliwa do zaakceptowania z punktu widzenia nadzorowanego procesu oraz określenie wpływu pozostałych czynników zewnętrznych w tym warunków środowiskowych na niepewność tego wyniku,
- ³¹ za wyjątkiem uruchomienia systemu pomiarowego przed pracą systemu sprężania,
- ³² zastosowanie kart kontrolnych pozwoli na monitorowanie przebiegu procesu i szybsze reagowanie na potencjalne wystąpienie odchyłań, umożliwiając tym samym predykcję występowania potencjalnych zagrożeń mających wpływ na rozregulowanie procesu,
- ³³ ocena zdolności krótko i długoterminowej procesu produkcji,
- ³⁴ modyfikowanemu w celu otrzymania jak najlepszej odpowiedzi systemu dla produktu,
- ³⁵ ang. Carbon Dioxide Control System,
- ³⁶ doświadczalny głębokowodny system hiperbaryczny,
- ³⁷ Katedra Technologii Prac Podwodnych AMW w Gdyni,
- ³⁸ Vaisala CARBOCAP@Carbon Dioxide Module GMM112,
- ³⁹ błąd grubzy, omyłka,
- ⁴⁰ wskazuje, że występująca wartość pomiaru $x_{min} = 194ppm$ jest o 2,34 odchylenia standardowego mniejsza niż \bar{x} ,
- ⁴¹ na poziomie istotności $\alpha = 0,05$ nie zidentyfikowano pomiarów odstających, pomiary pochodzą z tej samej populacji,
- ⁴² punkty pomiarowe skupiają się wokół linii prostej testowanie rozkładu oparto o $test A - D$ (Andersona - Darlinga),
- ⁴³ pogrupowany,
- ⁴⁴ w zakresie zawartości krytycznej ditlenku węgla w powietrzu oddechowym dla nurków wg. NO-07-A005, STANAG 1458 (ADivP-04), PN-EN 12021,
- ⁴⁵ MSA - ang. Measurement System Analysis,
- ⁴⁶ USL - ang. Upper Specification Limit,
- ⁴⁷ LSL - ang. Lower Specification Limit,
- ⁴⁸ CTQ - ang. Critical to Quality,
- ⁴⁹ zmienna typu dychotomicznego: spełnia/nie spełnia,
- ⁵⁰ zdolności do utrzymania cech metrologicznych,
- ⁵¹ wskazujący możliwości systemu pomiarowego ze względu na precyzję,
- ⁵² wskazujący możliwości systemu pomiarowego ze względu na precyzję i poprawność,
- ⁵³ w procesach zaleca się, o ile to możliwe, aby wartość wskaźnika wynosiła $C_{pk} > 1,33$. W firmach, dla których jakość produktu jest priorytetowa, jak np. GM lub Ford, przyjmuje się wartość wskaźników zdolności na poziomie co najmniej $C_p, C_{pk} > 1,67$,
- ⁵⁴ przyjmuje się również niekiedy wartość 5,15 s_g zamiast przyjętej 6: s_g wynika to z faktu, że w tym zakresie powinno mieścić się 99% z wszystkich wyników pomiarów,
- ⁵⁵ z racji ważności charakterystyki do obliczeń przyjęto $k = 0,1$,
- ⁵⁶ warunkiem koniecznym przydatności systemu do pomiaru cechy o tolerancji T jest spełnienie warunku $u \leq (0,1 \cdot T)$ [5],
- ⁵⁷ weryfikacji składowej systematycznej i przypadkowej na błąd pomiaru,
- ⁵⁸ stopień zgodności wyniku pomiaru z wartością rzeczywistą wielkości mierzonej,
- ⁵⁹ certyfikowanego materiału odniesienia,
- ⁶⁰ dla odczytu $x_{wz} = 200 ppm$, dopuszczalny błąd pomiaru $\Delta x_{wz} \leq 44ppm$ w zdefiniowanych warunkach środowiskowych (temperatura, wilgotność względna i ciśnienie atmosferyczne),
- ⁶¹ rozdzielczość systemu pomiarowego powinna znajdować się w granicach 2 – 5% tolerancji cechy [5],
- ⁶² do obliczeń niepewność wartości odniesienia $x_{wz} = 200 \pm 1ppm$ (dla $k = 2$) jest równa rozszerzonej niepewności podzielonej przez współczynnik rozszerzenia: $\frac{u}{k} = \frac{1}{2} = 0,5ppm$. Niepewność $\bar{x} = 201,02 \pm 0,3ppm$,
- ⁶³ należy zauważyć, że wniosek jest odmienny niż w przypadku zastosowania testu $t - Studenta$ z powodu nie uwzględnienia wartości niepewności,
- ⁶⁴ ang. % Var (Repeatability),
- ⁶⁵ ang. % Var (Repeatability and Bias),
- ⁶⁶ $\%Var(Rep), \%Var(Rep \text{ and } Bias) = 15\%$ odpowiada wartości współczynników zdolności dla systemu pomiarowego $C_g, C_{gk} = 1,33$,
- ⁶⁷ w takim przypadku należy zasugerować zmianę dotychczasowego harmonogramu konserwacji systemu,
- ⁶⁸ w takim przypadku należy ponownie zrewidować instrukcję wykonywania pomiaru,
- ⁶⁹ z punktu widzenia nadzorowanego procesu,
- ⁷⁰ kartę można opracować metodą projektową lub stabilizacyjną, na podstawie serii co najmniej $n > 30$ pomiarów przed obliczeniem i wykreśleniem granic kontrolnych oraz linii centralnej. Po eliminacji przyczyn deterministycznych sygnałów rozregulowania i stabilizacji procesu należy dokonać ponownej rekalkulacji granic kontrolnych,
- ⁷¹ zadanej wartości docelowej procesu pomiarowego odpowiadającej wartości wzorca,
- ⁷² ruchomy wzrost - wartość bezwzględna z różnicy pomiędzy dwoma kolejnymi pomiarami,
- ⁷³ LCL- ang. Lower Control Limit,
- ⁷⁴ UCL- ang. Upper Control Limit,
- ⁷⁵ zakres pomiarowy 0 – 2000ppm dla analizowanego systemu pomiarowego granica 0 – 700 ppm odpowiada obserwowanym wartościom wielkości mierzonej adekwatnej do zawartości CO_2 w powietrzu atmosferycznym,
- ⁷⁶ w tych samych warunkach pomiaru,
- ⁷⁷ dane poddano randomizacji polegającej na dokonaniu wyboru serii $n = 100$ wyników pomiarów dla każdego wzorca,
- ⁷⁸ wielokrotnie mniej niż błąd deklarowany przez producenta,
- ⁷⁹ dla wzorca 0ppm CO_2 ,
- ⁸⁰ dla wzorca 600ppm CO_2 ,
- ⁸¹ ang. Slope,
- ⁸² współczynnik kierunkowy $a = 0,0435$ jest istotnie różny od zera ($p - value = 0$), testowana hipoteza $H_0: a = 0$ zostaje odrzucona na rzecz hipotezy alternatywnej $H_1: a \neq 0$,
- ⁸³ bez oceny stabilności długoterminowej,
- ⁸⁴ ze względu na fakt, że pomiary są wykonywane przez system zautomatyzowany, operator nie ma wpływu na wykonywany pomiar a zatem i rozrzut systemu pomiarowego,
- ⁸⁵ skrzyżowana tzn. możliwych jest wykonania kilku pomiarów na jednej części (etalon),
- ⁸⁶ w obu przypadkach $< 10\%$,
- ⁸⁷ spełniony został warunek normalności rozkładu, równości wariancji i randomizacji danych,
- ⁸⁸ pokrywające zakres zmienności nadzorowanego procesu,
- ⁸⁹ ang. TV – total variation,
- ⁹⁰ wzorcami,
- ⁹¹ odtwarzalność nie jest rozpatrywana,
- ⁹² w kolumnie %Contribution,
- ⁹³ ang. part to part,
- ⁹⁴ ang. total gage R&R,
- ⁹⁵ ang. number of distinct categories,
- ⁹⁶ system posiada zatem 100 kategorii statystycznie rozróżnialnych,
- ⁹⁷ $ndc \geq 14$ system zdalny, $ndc = 4 - 13$ zdalny warunkowo, $ndc \leq 3$ niezdatny,
- ⁹⁸ wymaga się min.10,

⁹⁹ rozrzutu,

¹⁰⁰ ang. precision to tolerance,

¹⁰¹ wariancja systemu pomiarowego (*total gage GRR*) σ^2_m ,

¹⁰² gdzie $6 \cdot s = GRR$,

¹⁰³ opcjonalnie $k = 5,15$,

¹⁰⁴ wariancja procesu (*proces variation*) σ^2_p ,

¹⁰⁵ ang. SNR - signal-to-noise ratio,

¹⁰⁶ informuje ile razy zmienność systemu pomiarowego jest mniejsza od zmienności procesu,

¹⁰⁷ z środkowej strefy zakresu zmienności kontrolowanego procesu,

¹⁰⁸ z uwzględnieniem powtarzalności, nieliniowości i niepewności kalibracji,

¹⁰⁹ wynoszącej $\pm 2\%$ zakresu $\pm 2\%$ odczytu z uwzględnieniem powtarzalności, nieliniowości pomiarów i niepewności kalibracji,

¹¹⁰ za wyjątkiem odtwarzalności ze względu na system automatyczny bez udziału operatora,

¹¹¹ zgodnie z badaniami: Trends in atmospheric Carbon Dioxide – Global Monitoring Division of National Oceanic and Atmospheric Administration,

¹¹² będą one przedmiotem odrębnej publikacji,

¹¹³ poprzez zastosowanie wytypowanych systemów wskaźnikowych,

¹¹⁴ Przeniesione Zestawy Zasilania Powietrzem wdrożono do *MW RP* w latach 2003-2007 w ramach projektu A. WOŹNIAK „System zaopatrywania tlenem medycznym i powietrzem oddechowym okrętu podwodnego typu *KOBBEN*” Nr rej. 2/2003/R/DMW. Wykonawca pierwszego egzemplarza produkcji seryjnej dla *MWRP*, PHU „AQUATICUS”,

¹¹⁵ ograniczony dostęp do laboratorium fizykochemicznego, długotrwały pobyt okrętu w morzu,

¹¹⁶ w tym saturowanych i na dużych głębokościach,

¹¹⁷ *OP* - okręt podwodny,

¹¹⁸ np. w ramach badań eksploatacyjnych pojedynczych egzemplarzy urządzeń w wyspecjalizowanym laboratorium *SZ RP*,

¹¹⁹ ang. Reanalysis,

¹²⁰ kompensacji problemu produkcyjnego poprzez nadmierne magazynowanie zapasów wkładów filtracyjnych,

¹²¹ ze względu na monitoring *online* i obserwację trendów istnieje potencjalna możliwość realizacji zaopatrywania wg. zasady ang. *JIT* – just in time,

¹²² jak np. okręty proj. „*KORMORAN*” oraz „*RATOWNIK*”,

¹²³ pomimo deklaracji producenta zidentyfikowano systemy dostępne na rynku o wątpliwej jakości nie spełniających wymagań klienta,

¹²⁴ analiza ang. *QFD* – Quality Function Deployment (często także nazywana ang. *House of Quality*) dla *CCS*,