

ANALIZA PROCESU OTRZYMANIA POWIETRZA ODDECHOWEGO DO CELÓW HIPERBARYCZNYCH

Arkadiusz Woźniak

Zakład Technologii Prac Podwodnych, Akademia Marynarki Wojennej w Gdyni

STRESZCZENIE

Jakość powietrza oddechowego odgrywa kluczowe znaczenie dla bezpieczeństwa nurków i obiektów hiperbarycznych. Paradoksalnie, zmiana przepisów dotyczących wymagań jakościowych dla czynników oddechowych, wymusiła konieczność weryfikacji bazy technicznej i laboratoryjnej wykorzystywanej do ich produkcji i kontroli. W artykule przedstawiono wyniki badań związanych z racjonalizacją procesu otrzymywania i dystrybucji powietrza oddechowego przeznaczonego na tlenowe warunki hiperbaryczne. Pracę przeprowadzono przy wykorzystaniu metody SixSigma.

Słowa kluczowe: technologia prac podwodnych, nurkowe czynniki oddechowe, zdolność proces, karty kontrolne.

ARTICLE INFO

PolHypRes 2018 Vol. 62 Issue 1 pp. 7 - 32

ISSN: 1734-7009 eISSN: 2084-0535

DOI: 10.2478/phr-2018-0001

Strony: 26, rysunki: 23, tabele: 7

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

Typ artykułu: oryginalny

Termin nadeśnięcia: 13.08.2017 r.

Termin zatwierdzenia do druku: 29.09.2017 r.

Publisher

Polish Hyperbaric Medicine and Technology Society



WSTĘP

Zmiany związane z przystąpieniem Polski do *Paktu Północnoatlantyckiego (NATO)* spowodowały konieczność modernizacji *SZ RP* w celu zapewnienia interoperacyjności. Implementacja dokumentów standaryzacyjnych *STANAG*¹ w *SZ RP* wymagała podjęcia wielu działań organizacyjnych mających na celu rozwiązanie pojawiających się sytuacji problemowych. Jedną z nich była niewystarczająca jakość powietrza oddechowego przeznaczanego do celów hiperbarycznych. Bezwarunkowe przyjęcie przez Polskę postanowień *STANAG 1458*² oraz *AdivP-01*³ bez odpowiedniego przygotowania *SZ RP* ograniczyło poważnie możliwość wykonywania działań podwodnych, zmniejszając wykorzystanie krajowego wyposażenia do produkcji powietrza oddechowego.

SYTUACJA PROBLEMOWA

Jak pokazała wykonana na przełomie wieków analiza kontekstu⁴ sytuacji problemowej związanej z zapewnieniem odpowiedniego poziomu jakości w procesie zabezpieczenia *SZ RP* w powietrze oddechowe, konieczne było podjęcie działań systemowych rozłożonych w czasie. Wyodrębniony z kontekstu system zapewnienia powietrza oddechowego w nagłym zetknięciu z wymaganiami *NATO* stwarzał potencjalne zagrożenie znacznego ograniczenia zdolności operacyjnej poprzez brak możliwości wykorzystania sprzętu będącego w dyspozycji *SZ RP*.

Ukierunkowane działania miały zapewnić w określonej perspektywie czasowej usunięcie wysokiego poziomu niesprawności źródeł zasilania powietrzem oddechowym. Jeszcze w 2002r., już po rozpoczęciu programu zmian w systemie zabezpieczenia w powietrze oddechowe, skala niedopuszczania do wykorzystania wynosiła blisko 80–90% [1] w stosunku do całej populacji źródeł zasilania w *SZ RP*. Konieczne zmiany wymagały ponoszenia znacznych kosztów związanych z modernizacją systemów otrzymywania i dystrybucji powietrza oddechowego eksploatowanych w *SZ RP* oraz stopniowego zastępowania starych systemów nowymi. W artykule przedstawiono równoważenie dwóch procesów: modernizacji oraz sukcesywnej wymiany starych systemów na nowe.

Dla zawartości normatywnych [2] zanieczyszczeń powietrza oddechowego przeprowadzono analizę ich toksycznego oddziaływania. Oparto ją na opublikowanych wcześniej wynikach badań, które pomimo znacznego upływu czasu są nadal aktualne [3]. Zostały one uzupełnione o nowsze wyniki w publikacjach późniejszych [4].

Z diagnozy sytuacji problemowej wynikało, że do zapewnienia zaopatrzenia *SZ RP* w odpowiednie systemy do otrzymywania, przechowywania i dystrybuowania powietrza oddechowego nie wystarcza jedynie wymiana systemów sprężarkowych, filtracyjnych oraz systemów dystrybucji na nowsze. Zaistniała także potrzeba modernizacji bazy laboratoryjnej oraz budowy pracowni do oczyszczania – jak na warunki tlenowe elementów systemów technicznych służących do otrzymywania, przechowywania i dystrybucji powietrza oddechowego.

CEL PRACY

Celem prac była racjonalizacja procesu otrzymywania, utrzymywania i dystrybucji powietrza oddechowego przeznaczanego na tlenowe warunki hiperbaryczne przy wypełnieniu założonych krytycznych wymagań jakościowych *CTQ55*. Przyjęto, że możliwe jest wykorzystanie podejścia *SixSigma* do osiągnięcia celu projektu poprzez realizację zadania polegającego na ustaleniu i zrealizowaniu koniecznego zakresu modernizacji dotychczas użytkowanych systemów do otrzymywania, utrzymywania i dystrybucji powietrza oddechowego przeznaczanego na tlenowe warunki hiperbaryczne.

METODA

Pracę przeprowadzono przy wykorzystaniu uznanych metod naukowych podejścia *SixSigma*, które jest jednym z wielu stosowanych systemów projakościowych. Metoda ta jest ukierunkowana na realizację długoterminowej strategii poprawy jakości polegającej na eliminacji występującej zmienności procesu na wszystkich etapach jego realizacji poprzez sukcesywne wdrażanie projektów doskonalących. Podejście *SixSigma* łączy znane techniki sterowania jakością (*SPC*⁶) z innymi metodami statystycznymi. Podstawą tej metody jest usprawnianie i ciągłe tworzenie nowych, doskonalszych rozwiązań w ramach usprawnianego procesu. Doskonalenie i kształtowanie zdolności krańcowo niewydolnego procesu oparto o zastosowanie sprawdzonej, kompleksowej metody poprawy produktu. Stale dążono do sukcesywnej redukcji zmienności.

Zaletą metody jest jej ukierunkowanie na maksymalizację redukcji defektów w procesie, prowadzącej do podniesienia jakości przy racjonalnym i możliwym do zaakceptowania nakładzie kosztów. Konsekwentne zastosowanie ustalonego algorytmu postępowania *DMAIC*⁷ oparte o realizację zestawu czynności lub zadań w sposób metodyczny prowadzi do osiągnięcia pożądanego rozwiązania. Większość systemów poprawy jakości bazuje na prostych działaniach porządkujących i motywujących, przykładowo *Lean Management*.

Kompleksowe podejście *SixSigma* nie eliminuje tych metod, jest jedynie ich rozszerzeniem. Z chwilą, gdy wszystkie ewidentne, deterministyczne przyczyny zakłócające rozpatrywanego procesu zostaną zlikwidowane prostymi metodami, to do poszukiwania resztkowych deterministycznych zakłóceń można użyć innych metod matematycznych pozwalających na zdiagnozowanie, jak daleko proces odbiega od jego naturalnej zmienności. Mała popularność podejścia *SixSigma* bierze się między innymi z konieczności ponoszenia znacznych nakładów na oprogramowanie i zatrudnienie zespołu przeszkolonych specjalistów potrafiących użyć metod naukowych do prowadzenia procesów przemysłowych i działań laboratoryjnych.

Zastosowanie tej strategii podejścia wymaga specjalnych narzędzi i technik statystycznych, co powoduje stosunkowo wysoki koszt ich wdrożenia. Największym problemem jest również konieczna zmiana podejścia uczestników

procesu produkcyjnego wynikająca ze zmiany kultury organizacyjnej procesu i jego organizacji. Wynika z tego konieczność stałego szkolenia pracowników w zakresie przestrzegania *SOP* ⁸.

Pomimo tych trudności zdecydowano się na świadomą realizację projektu w oparciu o strategię *SixSigma*. Przy realizacji celu pracy ze względu na ograniczone zasoby i możliwości posłużono się jedynie wybranymi metodami stosowanymi przy podejściu *SixSigma*. Do definiowania celów pracy wykorzystano analizę kontekstową opartą na metodzie *SWOT*⁹. Przy definiowaniu racjonalizowanych procesów wykorzystano diagram *QFD*¹⁰, a w analizie ryzyka podejście *FMEA*¹¹. Bazę otrzymywanych odpowiedzi badanego systemu analizowano pod kątem możliwego do wyeksplorowania determinizmu metodami eksploracji danych *Data Mining*. Eksploracja zgromadzonej bazy zbiorów danych obserwacyjnych próbek kontrolnych była prowadzona w kierunku identyfikacji występowania nieoczekiwanych związków i zakłóceń specjalnych. Stabilność racjonalizowanych procesów badano przy wykorzystaniu metod kontroli statystycznej *SPCSPC* ^{12 13}.

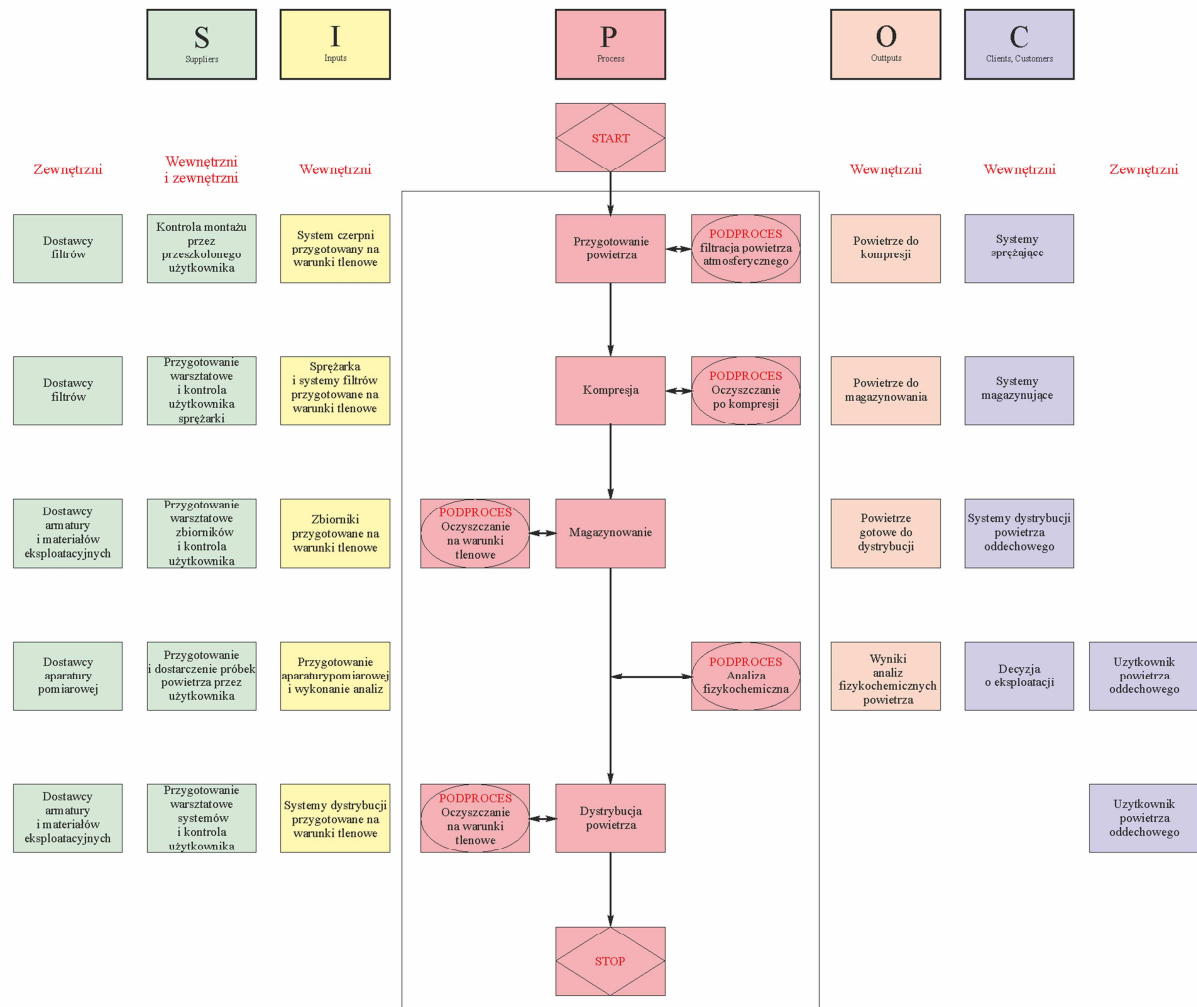
Wnioski wyciągano, stosując metody wnioskowania statystycznego w oparciu o praktyczne rozkłady zmiennej losowej. Przy prowadzeniu eksperymentów stosowano typowe metody deterministycznego projektowania eksperymentów¹⁴ oraz zasady rachunku niepewności wyników pomiarów przy wykorzystaniu metod analizy statystycznej serii obserwacji – metoda *typu A* [5].

BADANIA

W fazie definiowania¹⁵ określono proces, który będzie racjonalizowany. Wskazano jego miejsce w systemie oraz odniesienie systemu do najbliższego otoczenia¹⁶. Zdefiniowano głównych interesariuszy ulepszanego procesu oraz określono ich wymagania *CTQ*, krytyczne z punktu widzenia jakości produktu [6]. Przełożono wymagania klienta na wymagania dotyczące jakości *CTQ*¹⁷. Zdefiniowano wysokopoziomową mapę procesu tym samym określono kontekst oraz powiązany z ulepszanym procesem system i inne procesy działające w tym systemie. Zhierarchizowano produkty i ich powiązania z wymaganiami jakościowymi *CTQ*. Następnie w fazie pomiaru scharakteryzowano, poprzez ustalenie hierarchii metodą *QFD*¹⁸ zdiagnozowane¹⁹ *CTQ* dla racjonalizowanego procesu. Wykonano wstępną analizę ryzyka dla procesu zapewnienia powietrza do celów hiperbarycznych metodą *FMEA*²⁰. Pozwoliło to na ustalenie metod poprawy stabilności procesu ze względu na spełnienie *CTQ*. Analiza pokazała, że wiele z charakterystyk produktów zależy od siebie wzajemnie²¹. Jako trzy najważniejsze procesy otrzymywania powietrza oddechowego na hiperbaryczne warunki tlenowe uznano procesy: kontroli jakości, filtrowania i szkolenia.

Przyjęto że, głównym wskaźnikiem osiągnięcia celu będzie występowanie zanieczyszczeń przyjętych jako krytyczne na poziomie niższym od ustalonych zawartości granicznych, przynajmniej w 90% analizowanych próbek. Następnie ponownie przeanalizowano mapę procesu, którą uzupełniono o system analizy fizykochemicznej. Uzupełnienie to jest istotne, gdyż wyniki badań fizykochemicznych powietrza stanowiły odpowiedź systemu potwierdzającą spełnienie bądź niespełnienie wymagań dla granic procesu – rys. 1. Pominięto analizy dla systemu pomiarowego, gdyż zostały one przeprowadzone w badaniach wcześniejszych [7].

W fazie analizy wyznaczono aktualny występujący poziom zanieczyszczeń w otrzymywanym powietrzu oddechowym na podstawie systematycznie i celowo zbieranych, magazynowanych oraz opracowywanych danych. Przeprowadzono eksperyment techniczny pozwalający wytypować zestawy filtracyjne dostępne na rynku lub możliwe do zaprojektowania, wdrożenia i powielania. Sprawdzone wypełnienie krytycznych wymagań jakościowych *CTQ* na podstawie odpowiedzi systemów zapewnienia powietrza oddechowego na hiperbaryczne warunki tlenowe. Porównano poziom wypełnienia wymagań jakościowych *CTQ* z osiągnięciami przodujących krajów *NATO*. Zdiagnozowano poziom zmienności procesu oraz kierunki jego ulepszenia.



Rys. 1 Poprawiona generalna mapa procesu otrzymywania, utrzymania i dystrybucji powietrza dopuszczonego na hiperbaryczne warunki tlenowe w postaci diagramu SIPOC.

DOBÓR SYSTEMU FILTRACJI I SPRĘŻANIA

Właściwy dobór systemów uzdatniania stanowił istotny problem przy przeprowadzeniu skutecznej modernizacji systemów zapewnienia powietrza oddechowego na hiperbaryczne warunki tlenowe. Podczas badań należało ustalić możliwości spełnienia krytycznych wymagań jakościowych *CTQ*. Przy typowaniu systemu sprężania do badań rozsądne jest zastosowanie metody najgorszych okoliczności przy uwzględnieniu sensowności utrzymania tych konstrukcji w dalszej eksploatacji. Kapitalizując wiedzę, poddano analizie dotychczas funkcjonujące typy rozwiązań konstrukcyjnych. Pomimo redukcji liczby brzegowych jednostek wojskowych i okrętów *MW RP*, eksploatowanych było od 100 do 150 różnego rodzaju systemów zapewnienia powietrza oddechowego na warunki hiperbaryczne. W tym około 26–30 sprężarek dużej wydajności, 30–40 sprężarek okrętowych na jednostkach pływających oraz 45–50 przenośnych systemów zasilanych elektrycznie lub spalinowo [8].

Po zapoznaniu się z wynikami pomiarów kwartalnych różnego rodzaju źródeł zasilania stwierdzono, że system zamontowany na okręcie proj.570 wyposażony w sprężarkę typu *EK 7,5 – 3M* i system filtracji *P140 BAUER* spełniał wymagania jakościowe *CTQ*, w odróżnieniu od pozostałej części systemów zabezpieczenia powietrza oddechowego na warunki hiperbaryczne.

Rozpoznanie rynku pokazało, że producenci krajowi nie są w stanie szybko zaoferować konfekcjonowanego typoszeregu wkładów filtrujących spełniających minimalne wymagania jakościowe *CTQ*. Na podstawie wykonanej analizy w tab. 1 przedstawiono ranking rozpatrywanych układów filtrujących [9]. Typoszereg systemów filtracji teoretycznie powinien zapewnić pokrycie krytycznych wymagań jakościowych *CTQ* w procesie. Badania systemów filtracji *P61* typoszeregu firmy *BAUER* przeprowadzono w oparciu o najbardziej rozpowszechnione w *SZ RP* sprężarki *EK2 – 150* i *A3HW1 GERA – 32/70*²².

Po wykonaniu badań stanowiskowych układu modelowego w oparciu o wytypowany model fizyczny uzyskano wyniki pomiarów dla próbek powietrza oddechowego, które przedstawiono w tab. 2. Zebrane wyniki pomiarów wstępnie potwierdziły możliwość zaspokojenia krytycznych wymagań jakościowych *CTQ* do produkcji powietrza oddechowego na warunki hiperbaryczne przez proponowane zestawy filtrów [10]. Zastosowanie w próbach zestawu filtrów wraz z separatorem wodno-olejowym i automatycznym zrzutem kondensatu spowodowało wielokrotne obniżenie udziałów *CO*, *CO₂*, *H₂O*, *CH₄* w produkcji.

Tab. 1

Ranking systemów filtrujących po ocenie parametrów technicznych i jakościowych pod kątem spełnienia wymagań jakościowych CTQ dla procesu zapewnienia powietrza oddechowego na hiperbaryczne warunki tlenowe.

Typ filtra	Ranking porównawczy – benchmarking
P140 BAUER	1
P120 BAUER	2
L&W COMPRESORS FP – 2/10 – 1/2,3	3
FWD – 200 ZSRR + GP – 200 ZSRR	4

Tab. 2

Porównanie analiz próbek kontrolnych źródeł zasilania powietrzem oddechowym przed i po modernizacji

Mierzony czynnik	Jednostka miary	Sprężarki			
		Przed modernizacją		Po modernizacji	
		Nr 2727	Nr 12833	Nr 2727	Nr 12833
Tlen	%	20,77	20,92	20,93	21
Ditlenek węgla CO_2	%	0,0468	0,0317	0,0	0,0101
Tlenek węgla, CO	ppm	0,69	0,62	0,41	0,32
Tlenki azotu NO_x	ppm	0,111	0,255	0,196	0,082
Pary C_nH_m w przeliczeniu na CH_4	$mg \cdot m^{-3}$	3,93	1	0,5	0,4
Para wodna H_2O	$mg \cdot m^{-3}$	111	56,98	10,95	9,55

Ocena możliwości upowszechnienia proponowanych filtrów wraz ze wskaźnikiem diagnostycznym²³ może umożliwić spełnienie krytycznych wymagań jakościowych CTQ. Eliminacja wpływu występujących zagrożeń niedotrzymania krytycznych wymagań jakościowych CTQ nastąpi poprzez modyfikację określonych podprocesów w sposób zapewniający uzyskanie produktów, które spełnią te wymagania dla racjonalizowanego procesu.

Badania przeprowadzono w ramach trzech określonych grup kontrolnych, których podział przedstawiono w tab. 3-4.

Tab. 3

Podział ogólny na grupy kontrolne ze względu na zastosowane rozwiązanie układu uzdatniania.

Rodzaj zastosowanego systemu sprężania i filtrowania	Grupa kontrolna
klasyczny wkład filtrujący + klasyczne źródło zasilania	1
nowy wkład filtrujący + klasyczne źródło zasilania	2
nowy wkład filtrujący + nowe źródło zasilania	3

Obserwacje prowadzono pod kątem oceny zmiany funkcji celu przy zmianach konfiguracji z wykorzystaniem metod statystycznego sterowania procesem SPC²⁴. Umożliwiło to określenie skali odpowiedzi na wprowadzone wymuszenia. Za proces wydajny uważano proces, który uznano za stabilny, wydolny i wycentrowany [11].

Tab. 4

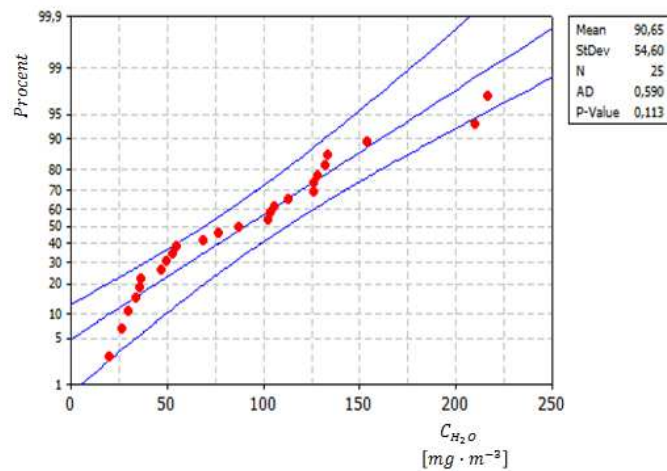
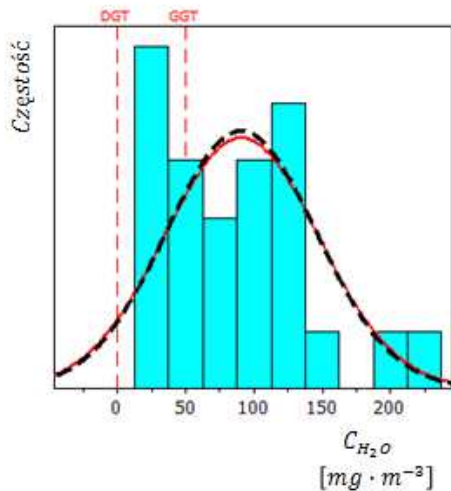
Podział ogólny na grupy kontrolne ze względu na zastosowane rozwiązanie układu uzdatniania zgodnie z tab. 3.

Typ sprężarki	Nr seryjny	Przynależność do grupy kontrolnej
BAUER VERTICUS 150 – 15 – 05	5108-1183	3
BAUER MARINER 320D	5208-3667	3
BAUER MARINER 320E	5208-3666	3
BAUER MARINER 320E	5104-1720	3
BAUER MARINER 250E	5101-0345	3
Sauer & Sohn WP 5000	442	3
EK – 7,5 – 3M	342	2
EK2 – 150	183	1
EK2 – 150M	2727	2
EK2 – 150M	12833	2
A3HW1M	4278/1035	1



WYNIKI BADAŃ

Decyzję dotyczącą poziomu inwestycji związanych z sukcesywną modernizacją lub wymianą źródeł zasilania oparto na wynikach badań. Na wstępnym etapie badań odniesiono się do uzyskanych wyników pomiarów w latach 2002–2006.



Rys. 2 Histogram rozkładu empirycznego danych pomiarowych z granicami kontrolnymi ($\bar{x} = 90,6 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$, $n = 25$, $DGT^{25} = 0$, $GGT^{26} = 50 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$) dla sprężarki EK2 – 150.

Rys. 3 Graficzny test normalności rozkładu danych empirycznych.

Na rys. 2 przedstawiono rozkład pomiarów zawartości H_2O wykonanych dla systemu wyposażonego w sprężarkę EK2 – 150 przed modernizacją, zgodnie z tab. 4. Wyniki wykonanych pomiarów C_{H_2O} leżą powyżej górnej granicy tolerancji $C_{H_2O}^{max}$, nie spełniając tym samym jednego z krytycznych wymagań jakościowych CTQ. Przedstawiony przykład obrazuje krańcowo niewydolny proces produkcyjny. Na histogramie odniesiono jego przebieg do zdefiniowanych granic specyfikacji wymagań CTQ. W przypadkach gdy uzyskanie poprawy jest ograniczone lub niemożliwe, dalsze działania należy powiązać z wykonaniem skoku technologicznego, zazwyczaj związanego z zastosowaniem nowego rodzaju maszyn, technologii, zmiany SOP itp. Powyższe działania w konsekwencji mogą doprowadzić do zmniejszenia rozrzutu procesu. Testowanie normalności rozkładu²⁷ dla danych empirycznych można przeprowadzić np. z zastosowaniem testu AD²⁸ – rys. 3.

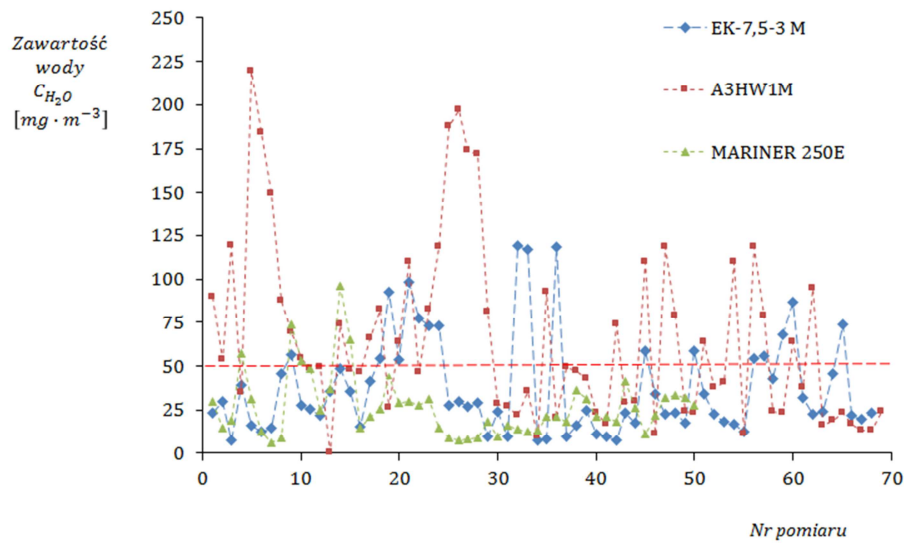
Teoretycznie dla rozkładu normalnego odchylenie standardowe populacji σ składającej się z n pomiarów daje rozproszenie standardowe $\sigma_{\bar{x}}$ wartości średniej \bar{x} wynoszące $\sigma_{\bar{x}} = \frac{\sigma}{\sqrt{n}}$ [12]. Przyjmuje się, że dla ustabilizowanego procesu pod kontrolą statystyczną rozproszenie wartości średnich \bar{x}_i dla poszczególnych serii pomiarowych nie powinno przekraczać granic kontrolnych znajdujących się w odległości $\pm 3 \cdot \sigma_{\bar{x}}$ od wyznaczonej linii centralnej będącej średnią globalną $\bar{\bar{x}} = \frac{1}{m} \cdot \sum_i^m \bar{x}_i$ [11]. Wyznaczone tak granice kontrolne zakresu zmienności zawierają około 99,73% wszystkich wartości dla rozkładu normalnego. Analizowany proces nie jest pod kontrolą statystyczną, gdyż rozproszenie wyników jest większe i znacznie wykracza poza wyznaczone granice tolerancji. Sugeruje to, że na proces oddziałuje zjawisko deterministyczne powodujące zwiększenie rozproszenia procesu, odbiegające od jego naturalnej zmienności. Daje to pole do ulepszania procesu poprzez oddziaływanie na niektóre jego parametry.

Na rys. 4. przedstawiono porównanie sprężarek w odniesieniu do maksymalnej zawartości H_2O wynoszącej dla powietrza oddechowego na warunki hiperbaryczne $C_{H_2O}^{max} = 5,0 \cdot 10^{-2} \text{ g} \cdot \text{m}^{-3}$ [10]. Zgodnie z oczekiwaniami, przedstawione na rys. 5 wyniki pomiarów pokazują, że najbardziej efektywnym rozwiązaniem było zastosowanie systemu MARINER 250E. Modernizacja sprężarki EK – 7,5 – 3M jest do zaakceptowania. Wyniki pomiarów uzyskane dla sprężarki A3HW1M odbiegają znacznie od wyników zarówno dla MARINER 250E, jak i EK – 7,5 – 3M.

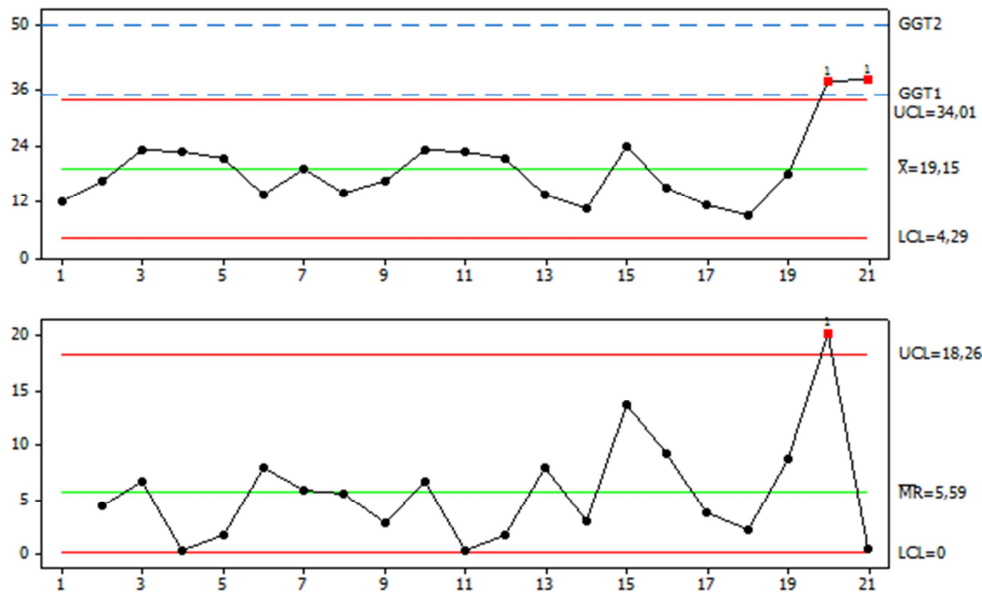
W ramach kontroli procesu produkcji powietrza oddechowego każdy rodzaj źródła zasilania badanej populacji rozpatrywano oddzielnie. Do prowadzenia bieżącej kontroli wykorzystano metodę statystycznego zarządzania jakością SPC realizowaną za pomocą kart kontrolnych [12,11]. Karty kontrolne służyły monitorowaniu jakości procesu poprzez kontrolę położenia i zmienności wyników pomiarów względem określonych granic tolerancji. Na rys. 6 przedstawiono uzyskane wyniki pomiarów H_2O , które naniesiono na kartę kontrolną²⁹ IX – MR³⁰. Karty kontrolne pozwoliły na monitorowanie wartości dla poszczególnych pomiarów pochodzących z kwartalnego sprawdzenia zawartości H_2O zbieranych na karcie IX – górny wykres na rys. 5.

Po dodaniu każdego punktu obliczana jest globalna wartość średnia \bar{x} oraz dolna i górna granica odniesiona do trzech wartości średniej odchylenia standardowego \bar{s} z pomiarów $\pm 3 \cdot \bar{s}$, za wyjątkiem punktów odstających. Punkty odstające zaznaczane są na czerwono i leżą poza przyjętymi granicami. Karta ruchomego rozstępu MR znajduje się poniżej karty indywidualnych obserwacji IX – dolny wykres na rys. 6. W związku ze stosowaną metodą nie ma ona ustalonej wartości dla pierwszego pomiaru. Na podstawie kolejnych wartości średnich ruchomego rozstępu \overline{MR} obliczana jest przybliżona wartość średniego odchylenia standardowego \bar{s} dla każdej porcji zebranych pomiarów, wykorzystywana do obliczenia granic dla pomiarów indywidualnych IX. Do obliczeń użyto standardowe oprogramowanie statystyczne MINITAB.

Z rozkładu pomiarów przedstawionych na kartach kontrolnych IX – MR rys. 6 wynika, że jakość powietrza odpowiada specyfikacji. Wszystkie pomiary znajdują się poniżej górnej granicy tolerancji GGT_2 . Poza linię kontrolną UCL ³¹ występują zakłócenia specjalne zarówno na karcie IX i ruchomego rozstępu \overline{MR} . Gdy na kartach kontrolnych nie zaobserwowano występowania rozregulowań rozumianych jako przekroczenie granic tolerancji czy stałych trendów, można założyć, że proces znajduje się pod kontrolą statystyczną³².



Rys. 4 Kolejne wyniki pomiarów stężenia C_{H_2O} w powietrzu oddechowym dla różnych sprężarek w latach 2002–2013.



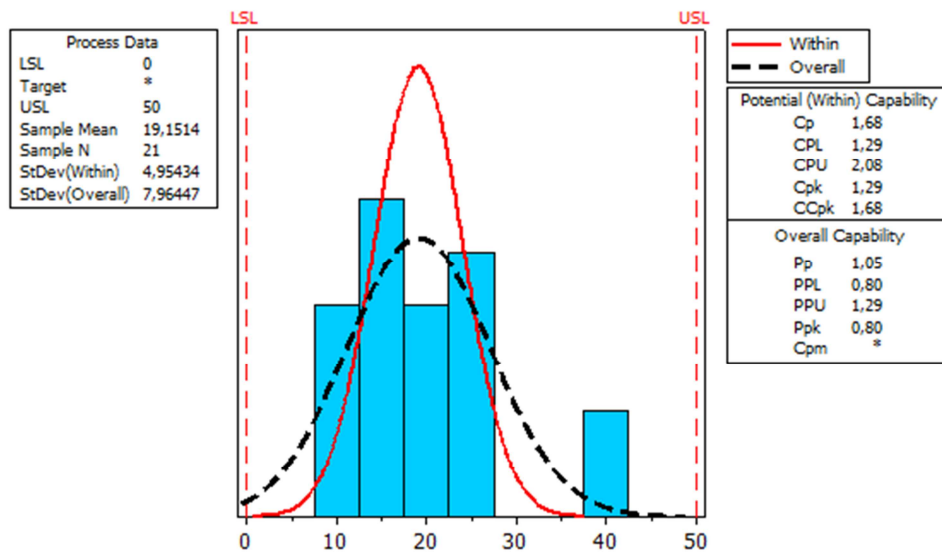
Rys. 5 Rozkład wyników pomiarów H_2O na karcie kontrolnej IX – MR uzyskanych dla sprężarki MARINER 320D.

Na rys. 6 przedstawiono histogram rozkładu danych empirycznych dla sprężarki MARINER 320D. Rozpatrywany rozkład znajduje się wewnątrz granic specyfikacji, pomimo tego występują w nim pomiary w strefie GGO ³³ oraz poza UCL świadczące o rozregulowaniu.

W celu oceny zdolności procesu stosuje się miary punktowe C_p i C_{pk} . Wskaźnik rozrzutu C_p ³⁴ wyraża potencjalną zdolność procesu do wypełnienia krytycznych wymagań jakościowych CTQ , jeśli wartość obranego do monitoringu parametru procesu będzie oscylowała w środku granic specyfikacji $[USL; LSL]$. Wskaźnik ten jest odniesieniem zakresu granic specyfikacji $USL - LSL$ do sześciokrotnej wartości odchylenia standardowego s dla procesu: $C_p = \frac{USL - LSL}{6 \cdot s}$. Wartość wskaźnika powinna być większa od jedności $C_p > 1$. Wskaźnik wycentrowania C_{pk} wskazuje potencjalną zdolność rzeczywistą procesu, uwzględniając jego aktualne wypośrodkowanie i rozrzut. Jako wskaźnik C_{pk} przyjmuje się wartość mniejszą z odległości globalnej wartości poprawnej, liczonej najczęściej jako wartość średnia globalna \bar{x} dla monitorowanego parametru w przyjętym czasie od granic specyfikacji $C_{pk} = \min \left\{ \frac{USL - \bar{x}}{3 \cdot s}; \frac{\bar{x} - LSL}{3 \cdot s} \right\}$.

W przypadku oceny zdolności procesu do wypełnienia krytycznych wymagań jakościowych CTQ rzeczywisty wskaźnik zdolności procesu C_{pk} ³⁵ powinien być co najmniej większy od jedności $C_{pk} > 1$ ³⁶. Analizowanie wskaźników daje możliwość identyfikacji występowania zakłóceń deterministycznych, które powodują niestabilność procesu. W przypadku gdy wartość obu wskaźników jest taka sama, można stwierdzić, że proces jest stabilny z punktu widzenia jego

wypośrodkowania. W zależności od potrzeb wskaźniki można obliczyć na etapie kwalifikacji maszyn³⁷ i oceny ich zdolności krótko-³⁸ lub długoterminowej. W tym przypadku wskaźniki przyjmują odpowiednio oznaczenia C_m, C_{mk} i P_p, P_{pk} .



Rys. 6 Histogram rozkładu empirycznego danych pomiarowych z granicami kontrolnymi ($\bar{x} = 19,15 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$, $n = 21$, $DGT = 0$, $GGT = 50 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$) dla sprężarki MARINER 320D.

Udział wyników przekraczających górną granicę zawartości CO_2 i H_2O dla grup kontrolnych badanych systemów zgodnie z tab. 3–4. zebrano w tab. 5.

Tab. 5

Udział wyników przekraczających górną granicę zawartości CO_2 i H_2O dla grup kontrolnych systemów zgodnie z tab. 3–4 w latach 2002–2013.

Rodzaj sprężarki	Grupa kontrolna	Częstość niespełniania wymagań jakościowych CTQ dla powietrza oddechowego kl. II [%]	
		CO_2	H_2O
EK2 – 150	1	20	66,60
A3HW1M	2	8,69	44,92
EK2 – 150M	2	14,81	44,23
EK 7,5 – 3M	2	16,17	23,52
Sauer & Sohn WP 5000	3	10,91	12,72
BAUER MARINER 250E	3	10	4,00
BAUER MARINER 320E	3	4,54	4,54
BAUER VERTICUS 180 – 15 – 5	3	25	3,57
BAUER MARINER 320D	3	9,52	0

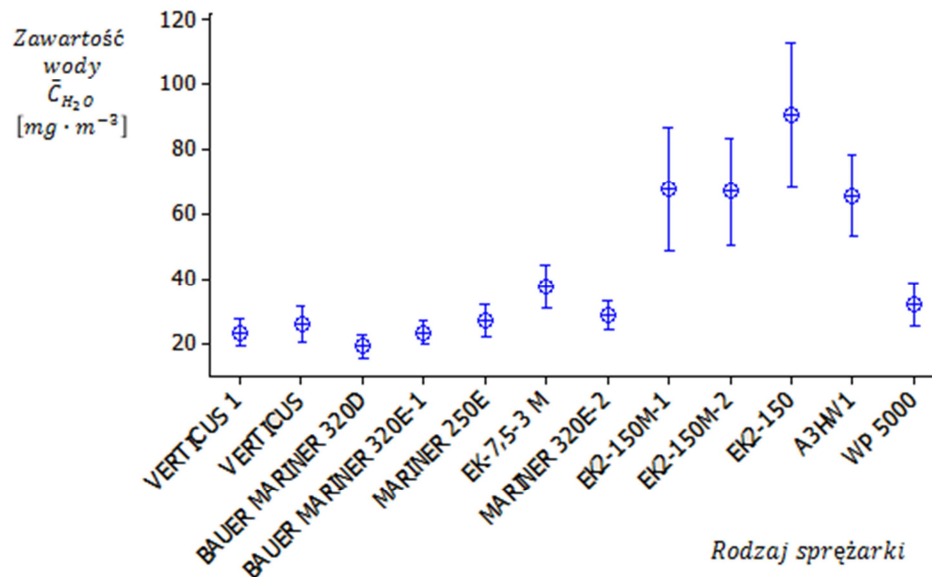
Największy udział wyników niezgodnych CO_2 dla nowego systemu jest zastanawiający. Te same systemy filtracji jak dla BAUER VERTICUS 180 – 15 – 5 stosowane w innych systemach sprężania grupy 3 mieściły się w węższych granicach niezgodności 5 – 10% przekroczeń wymaganej granicy $C_{\text{CO}_2}^{\text{max}} = 0,05\%$. Wynika stąd, że nawet najnowocześniejsze systemy filtracji nie są odporne na wpływy związane z nieprzestrzeganiem SOP przez operatora w zakresie nadzoru urządzeń i przy pobieraniu próbek kontrolnych.

Dla systemów zmodernizowanych grupy 2 wg tab. 3–4. wyniki pomiarów przekraczających zawartość $C_{\text{CO}_2}^{\text{max}} = 0,05\%$ oscylowały w zakresie 8,69%–16,17%. Systemy niezmodernizowane grupy 1 wg tab. 5. wykazywały około 20% przekroczeń granicy $C_{\text{CO}_2}^{\text{max}} = 0,05\%$.

W zakresie usuwania H_2O najbardziej skuteczne jest zastosowanie rozwiązań grupy 3, dla której udział niezgodności zawiera się w granicach od 3,57% do 4,54% – tab. 5. Dla grupy 2 w zależności od systemu sprężania i zastosowania tego samego systemu filtracji udział niezgodności oscyluje w zakresie od 23,52% do 44,92% – tab. 5. Najwięcej niezgodności obserwuje się dla grupy 1, występuje ich około 66,6% – tab. 5. Zastosowanie nowoczesnych systemów filtracji nie zapewnia spełnienia wymagań jakościowych CTQ na zadawalającym poziomie ze względu na wykorzystywanie wyeksploatowanych systemów sprężania. Te same systemy filtracji zastosowane wraz z nowymi systemami sprężania są wielokrotnie skuteczniejsze i powodują zmniejszenie liczby niezgodności dla H_2O : do 4% dla MARINER 250E oraz do 3,57% w przypadku VERTICUS 180 – 15 – 05.

Mała podatność na modernizację systemów zapewnienia powietrza oddechowego w większości sytuacji wynika z niskiej odporności starych systemów na błędy operatora. Wpływ tych zagrożeń powodował znaczne skrócenie żywotności wkładów filtrujących, a zatem zwiększał koszty eksploatacji, nie zapewniając dostatecznej stabilności procesu.

Dla analizowanych systemów zebranych w tab. 5. wyliczono wartości średnie \bar{x} oraz błąd wartości średniej $\Delta\bar{x}$ dla istotności wnioskowania na poziomie technicznym przy $\alpha = 0,05$. Wyniki przedstawiono na rys. 7. Różnice wartości średnich \bar{x} są istotne pomiędzy systemami nowymi a klasycznymi.



Rys. 7 Średnie $\bar{x} \pm \Delta x$ ($P = 0,95$) dla pomiarów zawartości H_2O dla różnych systemów sprężania w latach 2002–2013.

Tab. 6

Zestawienie wskaźników zdolności procesu zapewnienia zawartości H_2O dla granic specyfikacji $C_{H_2O} \in [LSL = 0; USL = 5,0 \cdot 10^{-2} g \cdot m^{-3}]$.

Hierarchia	Grupa kontrolna	Typ sprężarki	C_p	C_{pK}
Systemy zdolne				
1	3	MARINER 320D	1,68	1,29
2	3	MARINER 320E-1	1,14	1,06
3	3	VERTICUS 1 ⁱ	1,13	1,09
Systemy okresowo niezdolne				
4	3	VERTICUS	0,93	0,89
5	3	MARINER 320E-2	0,91	0,77
6	3	MARINER 250E	0,76	0,69
7	3	Sauer & Sohn WP 5000	0,5	0,36
8	2	EK-7,5-3M	0,43	0,21
Systemy całkowicie niezdolne				
9	2	A3HW1M	0,25	-0,16
10	2	EK2-150M-2	0,25	-0,17
11	1	EK2-150	0,17	-0,28

Dla analizowanych systemów zebranych w tab. 5. wyliczone wskaźniki zdolności procesu do wypełnienia krytycznych wymagań jakościowych CTQ dla zawartości H_2O odniesionej do wymagań dla powietrza oddechowego klasy II na poziomie $C_{H_2O} \in [LSL = 0; USL = 5,0 \cdot 10^{-2} g \cdot m^{-3}]$ zebrano w tab. 6. Systemy niezdolne całkowicie wymagają rotacji.

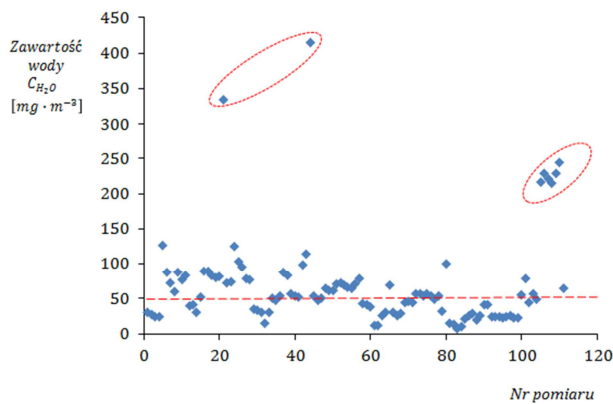
ANALIZA DANYCH ARCHIWALNYCH

Zgodnie z przyjętą procedurą wszelkie zapisy pomiarów krytycznych dla systemów sprężania i filtracji wykonanych w latach 2002–2006 zgromadzono w bazie danych pomiarów laboratoryjnych. Stanowiła ona podstawę do analizy skutków wprowadzanych zmian w fazie doskonalenia procesu. Wyniki uzyskanych pomiarów z 2002 r. przedstawiono na rys. 8.

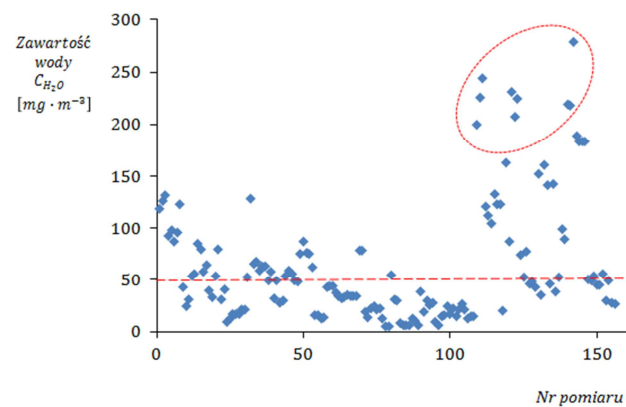
Wyodrębniono dwie grupy pomiarów odstających, które zaznaczono linią czerwoną. Po identyfikacji przyczyn i braku uzasadnienia ekonomicznego, organizacyjnego lub technicznego najmniej wydolne systemy eliminowano, zastępując je nowocześniejszymi. Na rys. 9 przedstawiono rozkład wyników pomiarów zawartości H_2O w 2003 r., a na rys. 10 w 2004 roku, w obszarze zakreślonym przedstawiono wyniki pomiarów laboratoryjnych, obrazujące zidentyfikowane nieprawidłowe⁴⁰ wskazania elektrolitycznego wilgotnościomierza laboratoryjnego OEM-7. Ten sam rozkład przedstawiono na karcie kontrolnej – rys. 11. Na rys. 12. zaznaczono pomiary, które wykonano dla okrętowych systemów hiperbarycznych, a następnie błędnie ujęto w bazie danych pomiarowych systemów sprężania i filtracji.



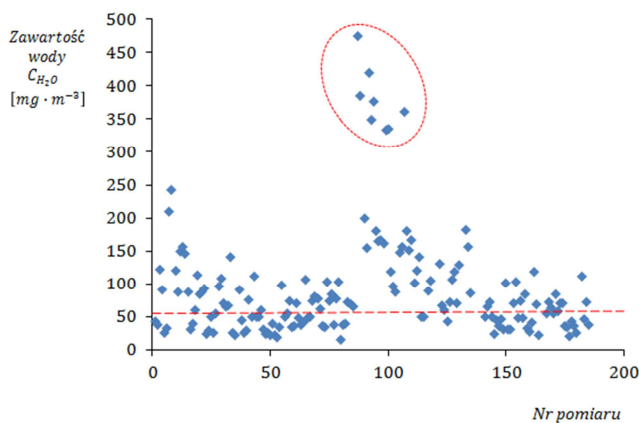
Wyniki pomiarów systemów hiperbarycznych pokazały zanieczyszczenie systemów magazynowych i dystrybucji. Na rys. 14–15 przedstawiono zbiorcze zestawienie wartości wykonanych pomiarów w latach 2002–2006 przed i po eliminacji wartości odstających lub nieprawidłowo zakwalifikowanych. Ze wstępnej liczby wykonanych 861 pomiarów zawartości H_2O po eliminacji do dalszej analizy i prowadzenia wnioskowania statystycznego na etapie doskonalenia procesu pozostawiono 817 pomiarów. Na rys. 13 przedstawiono zbiorcze zestawienie danych pomiarowych uzyskanych w latach 2002–2006. Pomiaru przedstawiono w sposób chronologiczny w kolejności ich obserwacji.



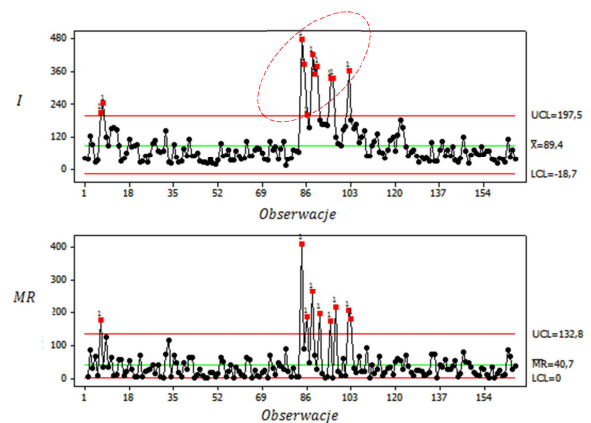
Rys. 8 Wykres rozrzutu dla wyników pomiarów zawartości H_2O w 2002 r.: $\bar{x} = 6,27 \cdot 10^{-2} g \cdot m^{-3}$, $n = 111$, $LSL = 0$, $USL = 5,0 \cdot 10^{-2} g \cdot m^{-3}$.



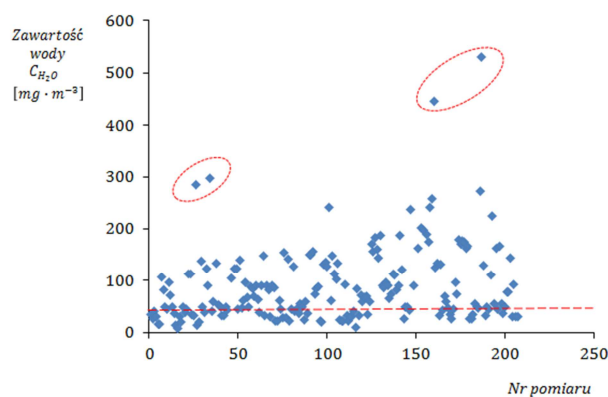
Rys. 9 Wykres rozrzutu dla wyników pomiarów zawartości H_2O w 2003 r. po eliminacji sprężarki $ST - 1 - 125$: $\bar{x} = 6,4 \cdot 10^{-2} g \cdot m^{-3}$, $n = 156$, $LSL = 0$, $USL = 5,0 \cdot 10^{-2} g \cdot m^{-3}$.



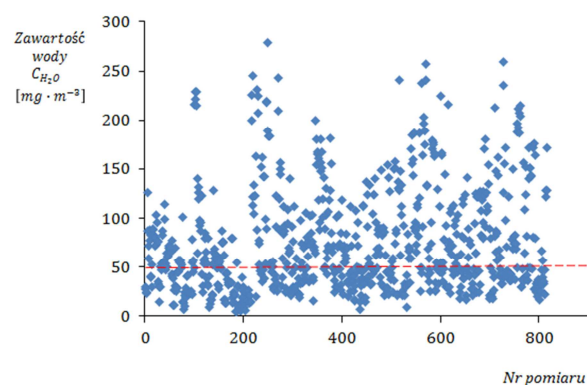
Rys. 10 Wykres rozrzutu dla wyników pomiarów zawartości H_2O w 2004 r.: $\bar{x} = 8,94 \cdot 10^{-2} g \cdot m^{-3}$, $n = 166$, $LSL = 0$, $USL = 5,0 \cdot 10^{-2} g \cdot m^{-3}$.



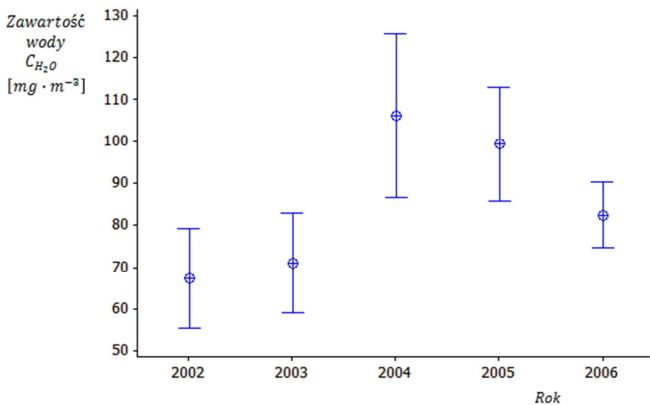
Rys. 11 Karta kontrolna IX – MR dla pomiarów zawartości H_2O w 2004 r. z zaznaczonymi pomiarami błędnymi OEM – 7.



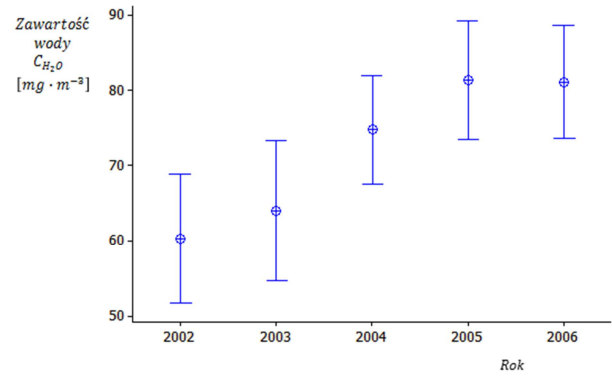
Rys. 12 Wykres rozrzutu dla wyników pomiarów zawartości H_2O w 2005 r.: $\bar{x} = 8,84 \cdot 10^{-2} g \cdot m^{-3}$, $n = 200$, $LSL = 0$, $USL = 5,0 \cdot 10^{-2} g \cdot m^{-3}$.



Rys. 13 Chronologiczne zestawienie pomiarów zawartości H_2O w latach 2002–2006 stanowiące rozkład porównawczy dla wnioskowania o późniejszych zmianach technologii.



Rys. 14 Wykres średnich wraz z błędem bezwzględnym $\bar{x} \pm \Delta x (P = 0,95)$ dla pomiarów zawartości H_2O w poszczególnych latach w okresie 2002–2006.



Rys. 15 Średnie wraz z błędem bezwzględnym $\bar{x} \pm \Delta x (P = 0,95)$ dla pomiarów zawartości H_2O w latach 2002–2006 po eliminacji wartości odstających.

Większość pomiarów H_2O wykonanych w latach 2002–2006 znajduje się powyżej wymaganej górnej granicy specyfikacji, a ich rozkład po usunięciu punktów odstających, dla których udało się znaleźć przyczynę deterministyczną, można uznać za stochastyczny i przyjąć jako rozkład praktyczny do wnioskowania statystycznego.

Takie wnioskowanie jest niezwykle rzadko stosowane ze względu na brak danych do zbudowania wiarygodnych stochastycznych rozkładów praktycznych. Prowadząc przez około piętnaście lat systemowe obserwacje, udało się zebrać na tyle bogaty materiał eksperymentalny, że takie wnioskowanie stało się możliwe⁴¹.

WYDAJNOŚĆ PROCESU

Średnio występowanie niezgodności dla H_2O za lata 2002–2004 kształtowało się na poziomie poniżej 10%, co odpowiada około $2,78\sigma$ ⁴², czyli wydajność procesu Y_{FT} ⁴³ określona jako produkt zaaprobowany w pierwszym podejściu wynosi w przybliżeniu $Y_{FT} \geq 90\%$. Jest to poziom niezadawalający, wymagający zmian, gdyż jak można przyjąć na podstawie analizy przebiega on już praktycznie pod kontrolą statystyczną i poza zmianą technologii nie ma innej metody podniesienia zdolności procesu.

Rozwiązanie sytuacji problemowej polegającej na możliwości wykonania skoku technologicznego dzięki zastosowaniu nowszych systemów sprężania i filtracji hamowane było barierą finansową i czasową. Ze względu na brak środków należało skoncentrować się na racjonalizacji procesu polegającego na systematycznym wdrażaniu rozwiązań modernizacyjnych grupy 2 i w ograniczonym zakresie nowszych systemów sprężania i filtracji grupy 3 w celu poprawy jakości procesu zapewnienia powietrza oddechowego na warunki hiperbaryczne.

Rozwiązania modernizacyjne dają możliwość częściowego usprawnienia procesu do czasu pokonania bariery finansowej pozwalającej na wykonanie skoku technologicznego. Zastosowanie nowych systemów sprężania, może się zbliżyć do spełnienia wymagań jakościowych w zakresie minimum $4,5 \cdot \sigma$, co odpowiada zgodnie z tab. 7 wydajności procesu na poziomie $Y_{Tp} > 99,87\%$ i liczbie defektów na milion wykonanych analiz⁴⁴ $DPMO < 1350$. Wartość Y_{Tp} nazywana jest wydajnością cyklu produkcyjnego⁴⁵ i jest prawdopodobieństwem p zajścia zdarzenia polegającego na niewystąpieniu defektów $k = 0$ w rozpatrywanym odcinku czasu.

Do oszacowania tego prawdopodobieństwa używa się teoretycznego rozkładu Poissona, gdyż zdarzenia polegające na wystąpieniu niezgodności są stosunkowo rzadkie i stąd uznaje się, że są wzajemnie niezależne. Rozkład Poissona jest granicznym rozkładem binominalnym dla zdarzeń rzadkich i ma postać formuły: $p(k, \lambda) = \frac{\lambda^k e^{-\lambda}}{k!}$, gdzie λ jest oczekiwaną liczbą zdarzeń polegających na wystąpieniu niezgodności, którą można obliczyć jako prawdopodobieństwo częstościowe wynoszące $\lambda = 1 - \frac{DPMO}{10^6}$.

W rozpatrywanym przypadku $\lambda = 0,00135$, a wzór na prawdopodobieństwo można uprościć: $p(k = 0, \lambda) = \frac{\lambda^k e^{-\lambda}}{k!} \Big|_{k=0} = e^{-\lambda}$. Wydajność ta $Y_{Tp} \equiv p(k = 0, \lambda)$ w rozpatrywanym przypadku wyniesie $Y_{Tp} = e^{-0,00135} \cong 0,998$. Miary jakości dla metody Six Sigma przedstawiono w tab. 7

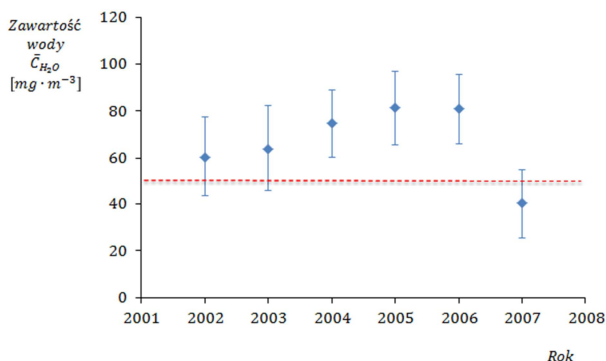
Udział niezgodności w procentach i częściach na milion ppm w funkcji krotności normalnych odchyłeń standardowych σ .

Krotność odchyłeń standardowych	Udział niezgodności DPMO	Udział niezgodności Y_{FT}
1σ	691462 ppm	31%
2σ	308538 ppm	69,2%
$2,5\sigma$	158655 ppm	84,2%
$2,8\sigma$	96800 ppm	90,3%
3σ	66807 ppm	93,3%
4σ	6210 ppm	99,4%
$4,5\sigma$	1350 ppm	99,87%
5σ	233 ppm	99,977%
6σ	3,4 ppm	99,99966%

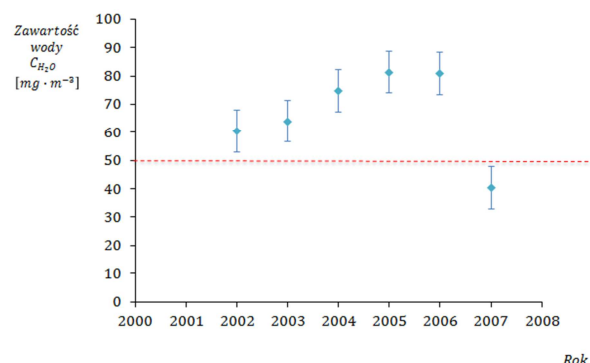
WYNIKI

Poniżej przedstawiono podsumowanie wyników badań powietrza oddechowego przeznaczonego do celów hiperbarycznych przeprowadzonych w latach 2002-2007. W tym czasie powietrze oddechowe przeznaczone do celów hiperbarycznych nadal odbiegało od stawianych wymagań jakościowych CTQ, choć w konsekwencji przeprowadzonych prac modernizacyjnych uzyskano wyraźną poprawę. Na rys. 17 przyjęto wnioskowanie oparte na niepewności standardowej $k = 1$ ($p \cong 0,68$), w odróżnieniu od rys. 16, dla którego zastosowano wnioskowanie statystyczne oparte na niepewności rozszerzonej $k = 2$ ($p \cong 0,95$).

Z porównania rys. 16 i rys. 17 wynika, że wnioskowanie oparte na teoretycznym rozkładzie normalnym nie pozwala na bezsporne stwierdzenie, że wynik z 2007 r. odbiega od pomiarów wcześniejszych, gdyż istotność α_0 dla tego wnioskowania zawiera się w przedziale $\alpha_0 \in [0,05; 0,32]$ i jest za wysoka w stosunku do powszechnie przyjmowanej wartości krytycznej $\alpha_0(kr) < 0,05$.



Rys. 16 Wykres wartości średniej z pomiarów zawartości H_2O wraz z niepewnością rozszerzoną $\bar{C}_{H_2O} \pm \Delta\bar{C}_{H_2O}(k = 2)$ dla rozkładu normalnego.



Rys. 17 Wykres wartości średniej z pomiarów zawartości H_2O wraz z niepewnością standardową $\bar{C}_{H_2O} \pm \Delta\bar{C}_{H_2O}(k = 1)$ dla rozkładu normalnego.

Dzieje się tak z powodu degeneracji danych zawierających porównywalny poziom błędów przypadkowych i systematycznych. Zmienność systematyczna związana jest z różną konfiguracją systemów, dla których wyniki pomiarów są uśredniane. Typowe wnioskowanie statystyczne dla dużej próbki o liczności powyżej $N > 30$ opiera się zazwyczaj na rozkładzie normalnym. Założenie o normalności rozkładu bierze się z przyjętej minimalizacji zmienności systematycznej do przynajmniej o rząd mniejszego poziomu niż zmienności przypadkowej, która może być traktowana jak „biały szum” mający rozkład normalny. Zaproponowane tutaj wnioskowanie w obszarze porównywalnego poziomu błędów przypadkowego i systematycznego może być prowadzone jedynie wtedy, gdy do dyspozycji pozostaje dostatecznie dużo danych historycznych tworzących rozkład praktyczny analizowanej zmiennej losowej.

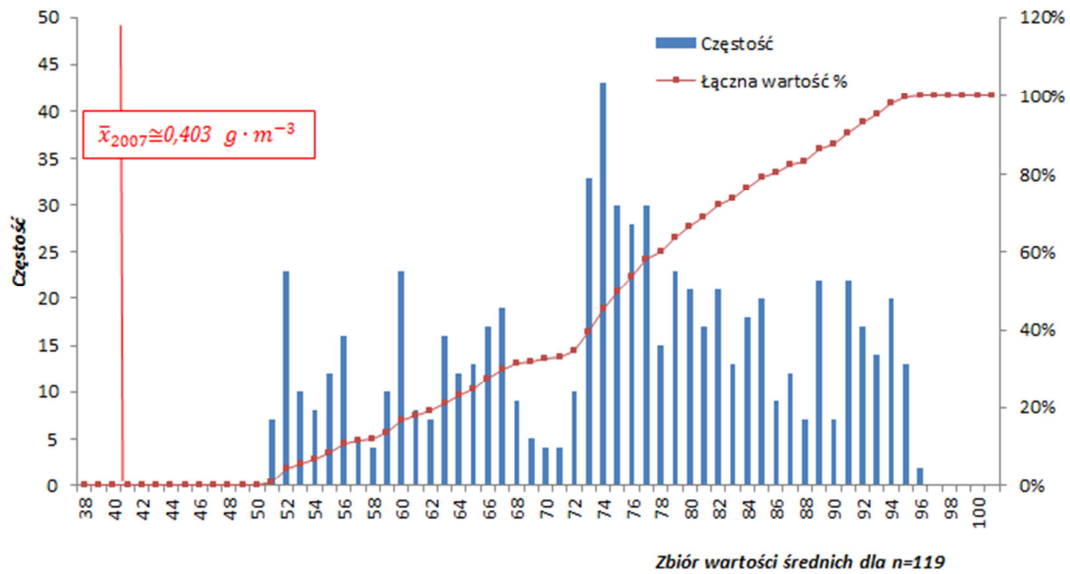
WNISKOWANIE

Do utworzenia rozkładu praktycznego mogą posłużyć zestawy wyników badań zawartości H_2O w powietrzu oddechowym do 2006 roku. Zebrano bazę $N = 818$ wyników pomiarów dla użytkowanych systemów do zapewnienia powietrza oddechowego na warunki hiperbaryczne od 2002 do 2006 roku. Prowadząc wnioskowanie dla 2007 roku, w którym wykonano $n = 119$ pomiarów, należy dla bazy pomiarów historycznych wybrać następujące po sobie $n = 119$ pomiarów i obliczyć dla nich wartość średnią. Następnie przesuwając się o jeden pomiar, należy obliczyć kolejną wartość średnią.

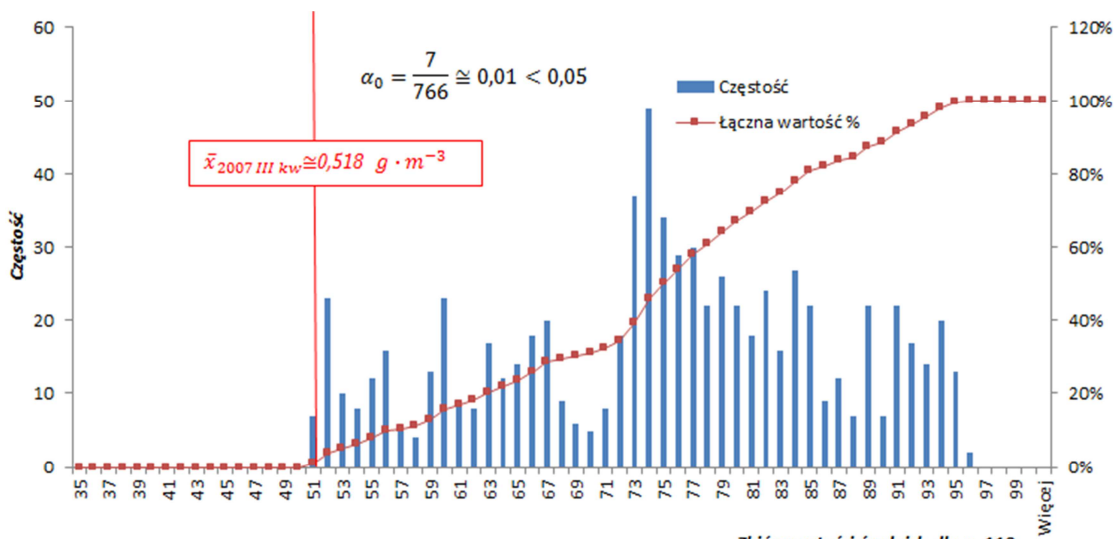
W ten sposób utworzy się rozkład empiryczny wartości średnich liczący $m = N - n - 1 = 698$ wartości – rys. 18. Potem postawiono pytanie, jak często w przeszłości występowała średnia $\bar{x}_{2007}(n = 119) \cong 0,403 \text{ g} \cdot \text{m}^{-3}$ otrzymana dla

2007 roku lub niższa. Można stwierdzić, że nie występowała ona w ogóle. Wynika stąd, że intuicyjnie obserwowana wyraźna zmiana dla 2007 roku, znajduje pełne potwierdzenie przy wnioskowaniu opartym na rozkładzie empirycznym.

Przeprowadzenie powyższego wnioskowania nie pozwoliło na określenie jego istotności na podstawie prawdopodobieństwa częstościowego p , gdyż liczba przypadków n wystąpienia obserwowanej różnicy w 2007 roku wyniosła zero $n = 0$. Dlatego powtórzono wnioskowanie dla kolejnych kwartałów 2007 roku, postępując analogicznie jak poprzednio.



Rys. 18 Histogram częstości występowania wartości średnich pomiarów H_2O w latach 2002–2006 oraz wartość średnia dla 2007 r. dla $n = 119$ i średniej $\bar{x}_{2007}(l = 119) \cong 0,403 \text{ g} \cdot \text{m}^{-3}$.



Rys. 19 Histogram częstości występowania wartości średnich z pomiarów H_2O w latach 2002–2006 oraz dla III kw. 2007 r. dla $n = 27$ i średniej $\bar{x}_{III \text{ kw} 2007}(l = 27) \cong 0,518 \text{ g} \cdot \text{m}^{-3}$.

Dla trzeciego kwartału 2007 roku dla liczności próby $l = 27$ otrzymano wartość średnią $\bar{x}_{III \text{ kw} 2007}(l = 27) = 0,5183 \text{ g} \cdot \text{m}^{-3}$. Dla rozkładu praktycznego o liczności $k = 766$ wynik ten lub mniejszy wystąpił $o = 7$ razy – rys. 19.

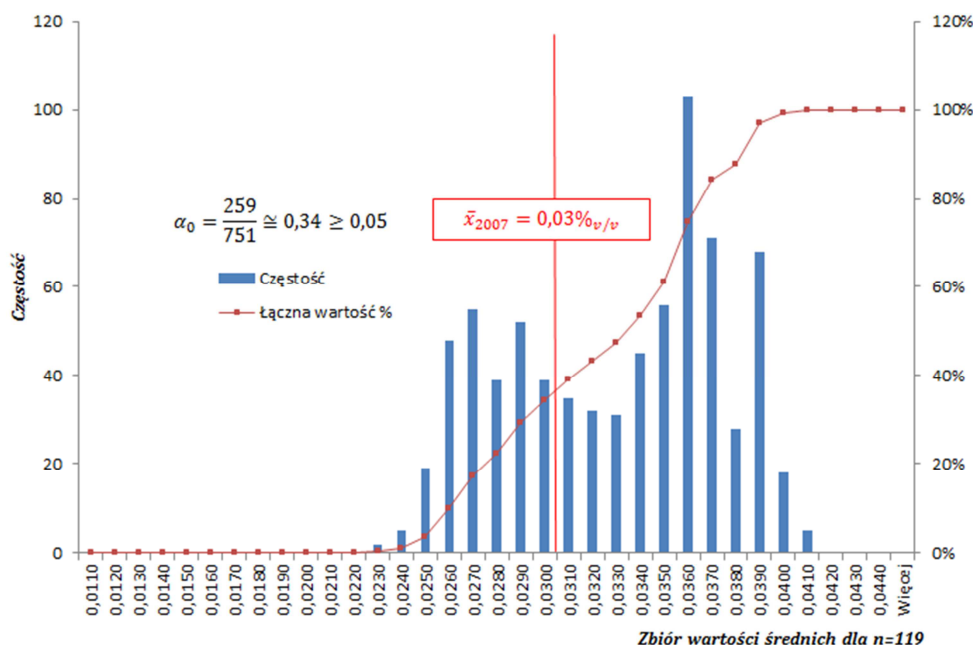
Stąd częstościowe prawdopodobieństwo p występowania wartości $\bar{x}_{III \text{ kw} 2007}(l = 27) = 0,5183 \text{ g} \cdot \text{m}^{-3}$ wynosi $p = \frac{o}{k} = \frac{7}{766} \cong 0,01$. Zakładając, że prawdopodobieństwo p jest średnio statystyczne, można przyjąć jego wartość jako istotność prowadzonego wnioskowania statystycznego $\alpha_0 \leq 0,01$. W oparciu o rozkład praktyczny dla 2007 r. zaobserwowano bezspornie, na poziomie ufności $\bar{P} > 99\%$, efekt różnicujący podjętych działań związanych ze zmianami technologii w stronę wyraźnej poprawy wypełnienia wymagań jakościowych CTQ dotyczących zawartości H_2O w powietrzu oddechowym. Podobną analizę wykonano dla zawartości CO_2 .

Do przeprowadzenia wnioskowania na podstawie rozkładu praktycznego posłużono się, jak w przypadku zawartości H_2O , wynikami badań zawartości CO_2 . Zebrano bazę $N = 871$ średnich wyników pomiarów dla użytkowanych systemów do zapewnienia powietrza oddechowego na hiperbaryczne warunki tlenowe za lata 2002–2006. Prowadząc wnioskowanie dla 2007 roku, wykonano $n = 119$ pomiarów zawartości CO_2 i utworzono rozkład empiryczny wartości średnich o liczności $m = N - n - 1 = 751$ – rys. 20. Sprawdzone, jak często występowała wartość średnia z 2007 roku $\bar{x}_{2007}(l = 119) = 0,03\%$, lub mniejsza w rozkładzie empirycznym, na $k = 751$ średnich z rozkładu praktycznego dla próby



prostej o liczności $l = 119$. Otrzymana wartość średnia $\bar{x}_{2007}(l = 119) \cong 0,03\%_v$ dla 2007 roku wystąpiła wcześniej $o = 259$ razy – rys. 20. Stąd częstościowe prawdopodobieństwo p występowania wartości $\bar{x}_{2007}(l = 119) = 0,03\%_v/v$ wynosi $p = \frac{o}{k} = \frac{259}{751} \cong 0,34$.

Przyjmując to prawdopodobieństwo p jako średnio statystyczne, można założyć jego wartość jako istotność prowadzonego wnioskowania statystycznego $\alpha_0 \leq 0,34$. Wynika stąd, że ze statystycznego punktu widzenia nie ma powodu sądzić, że w 2007 roku zaobserwowano istotną statystycznie zmianę z możliwością popełnienia błędu I rodzaju α_0 polegającego na odrzuceniu prawdziwej hipotezy zerowej H_0 o braku występowania różnicy w próbie prostej dla 2007 r. w stosunku do lat 2002–2006 na poziomie $\alpha_0 \leq 0,34$.



Rys. 20 Histogram wartości średnich pomiarów zawartości CO_2 w latach 2002–2006 oraz średniej $\bar{x}_{2007}(l = 119) = 0,03\%_v$ z 2007 roku.

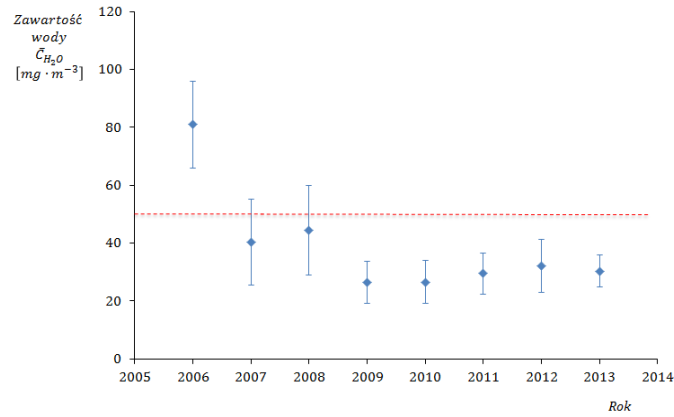
W oparciu o rozkład praktyczny dla 2007 roku nie zaobserwowano efektu różnicującego podjętych działań związanych ze zmianami technologii w stronę wyraźnej poprawy wymagań jakościowych CTQ dotyczących zawartości CO_2 w powietrzu oddechowym dopuszczonym na warunki hiperbaryczne, przeciwnie niż dla zawartości H_2O .

Przeprowadzenie wnioskowań statystycznych dla innych lat i innych zanieczyszczeń nie wykazało skokowej zmiany w kierunku zapewnienia warunków do spełnienia wymagań jakościowych CTQ na wyższym poziomie niż dla okresu porównawczego. Daje się jedynie zauważyć powolną, sukcesywną poprawę w kierunku lepszego wypełniania wymagań jakościowych CTQ .

KONTROLA PROCESU

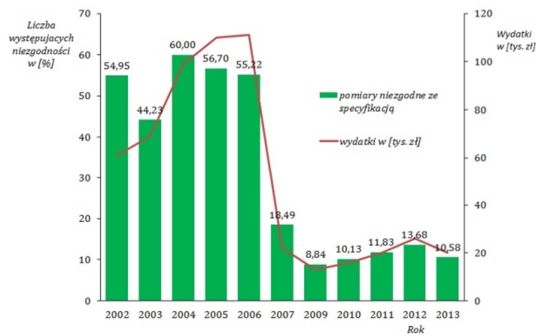
W procesie walidacji weryfikowano wydajność procesu i spełnienie wymagań jakościowych CTQ dla produktu. Na rys. 21 przedstawiono rozkład średnich $\bar{x}_{2006-2013}$ dla wyników pomiarów kontrolnych procesu w odniesieniu do zawartości H_2O względem rozkładu normalnego przy współczynniku rozszerzenia $k = 2$. Obniżenie zawartości \bar{C}_{H_2O} w fazie monitorowania ma charakter trwały, a uzyskane odpowiedzi modernizowanego systemu są lepsze jakościowo niż w latach 2002–2006. Na podstawie rozkładu wartości średnich $\bar{x}_{2002-2013}$ pomiarów wyodrębniono dwie grupy pomiarów: grupę I dla lat $l \in (2002 - 2006)$ i grupę II dla $l \in (2007 - 20013)$.

W wyniku przeprowadzonego wnioskowania statystycznego wykazano wcześniej istotną zmianę jakościową dla pomiarów zawartości H_2O , która nastąpiła w latach 2006–2007. W kolejnych latach miało miejsce dalsze udoskonalanie systemu, co potwierdzają różnice występujące pomiędzy obserwacjami z lat $l \in (2007 - 2008)$ i 2009 r. Od 2009 r. uzyskiwane wyniki pomiarów w większości systemów nowych i zmodernizowanych utrzymują się w granicach określonych wymaganiami jakościowymi CTQ .

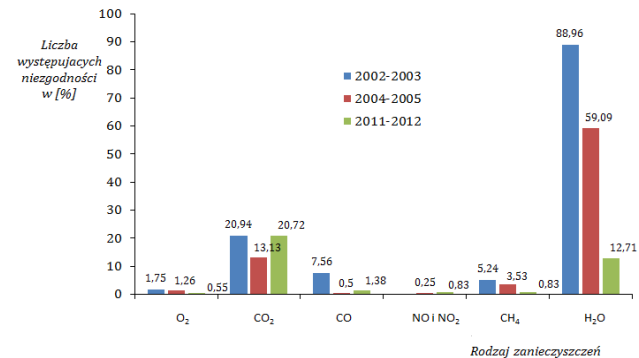


Rys. 21 Wykres wartości średniej z pomiarów zawartości H_2O wraz z niepewnością rozszerzoną $\bar{C}_{H_2O} \pm \Delta \bar{C}_{H_2O} (k = 2)$, przy wnioskowaniu na podstawie rozkładu normalnego.

Założono, że na aktualnym poziomie technologicznym zadawalające będzie spełnienie krytycznych wymagań jakościowych CTQ przy pierwszym podejściu Y_{FT} , czyli przy poziomie wydajności procesu $Y_{FT} \geq 90\%$, co odpowiada około $\sigma \cong 2,8$. Ten poziom okresowo został osiągnięty, gdyż uzyskano $Y_{FT} = 100 - 8,84 \geq 91,16\%$ – rys. 22.



Rys. 22 Liczba występujących niezgodności i poniesionych nakładów finansowych związanych z koniecznością wykonania powtórnej analizy powietrza w latach 2002–2013.



Rys. 23 Zmiany udziałów liczby niezgodności dla poszczególnych grup zanieczyszczeń z podziałem na wybrane okresy w latach 2002–2012.

W latach 2009–2013 udział próbek niespełniających wymagań kształtował się poniżej $Y_{FT} < 14\%$. Zmniejszająca się liczba niezgodności spowodowała wymierne oszczędności finansowe wynikające z braku konieczności wykonywania ponownych analiz laboratoryjnych⁴⁶ produktów. Na rys. 23 przedstawiono liczby niezgodności dla zawartości poszczególnych zanieczyszczeń powietrza oddechowego uzyskane w latach 2002–2013.

Obniżeniu liczby niezgodności w zakresie zawartości H_2O nie towarzyszyło proporcjonalne zmniejszenie liczby defektów w zakresie zawartości CO_2 . Wskazuje to na ograniczenia obecnie stosowanej technologii. Dalszą poprawę można osiągnąć jedynie poprzez jej zmianę.

ZAKOŃCZENIE

Prowadząc badania i wdrożenia w latach 2002–2017, osiągnięto zdolność procesu otrzymywania, utrzymywania i dystrybucji powietrza oddechowego dopuszczonego na tlenowe warunki hiperbaryczne w *Siłach Zbrojnych RP* wahającą się w zakresie $2,5\sigma - 3,0\sigma$ – tab. 7.

Pokazano, że realizacja celu pracy może być osiągnięta w sposób efektywny przy zastosowaniu metod wykorzystanych w podejściu *SixSigma*, które użyto do diagnozowania zakresu potrzebnej modernizacji na każdym etapie prac jako podstawowego zadania projektowego. Przy racjonalizacji procesów produkcyjnych zakłada się dążenie do trwałego przekroczenia poziomu 6σ .

Obserwując proces otrzymywania, utrzymywania i dystrybucji powietrza oddechowego dopuszczonego na tlenowe warunki hiperbaryczne w *Siłach Zbrojnych RP*, można w sposób pewny dojść do wniosku, że przy obecnym stanie dostępnej techniki nie jest możliwe osiągnięcie takiego poziomu zdolności procesu dla całego systemu.

Z drugiej strony śledząc rozwiązania techniczne i opisy dostępnej na rynku techniki, trudno nie ulec wrażeniu, że osiągnięcie zdolności procesu na poziomie $4,5\sigma$ powinno być w zasięgu ręki, jeżeli dysponuje się dostatecznymi środkami na inwestycje.

WNIOSKI KOŃCOWE

W wyniku realizacji projektu udało się wypracować ważne wnioski, które stoją w opozycji do powszechnie aprobowanych przekonań:

1. Obecny stan techniki w warunkach eksploatacyjnych nie pozwala na osiągnięcie wyższej niż 3σ zdolności procesu otrzymywania, utrzymywania i dystrybucji powietrza oddechowego przeznaczonego na tlenowe warunki hiperbaryczne. Historia urządzeń sprężających, silników napędowych i typowych instalacji inżynierii chemicznej jest długa i obfitowała w rewolucyjne zmiany technologii. Przyglądając się systemom do otrzymywania, utrzymywania i dystrybucji powietrza oddechowego przeznaczonego na tlenowe warunki hiperbaryczne, trudno jest się oprzeć wrażeniu, że urządzenia te reprezentują główny nurt postępu technicznego. Poddając pod głosowanie inżynierów poziom zdolności tego procesu, na podstawie oglądu dostępnej techniki, niewielki odsetek inżynierów odnosiłby się sceptycznie do tezy, że zdolność na poziomie $4,5\sigma$ nie jest w ich przypadku gwarantowana. Jednak okazuje się, że nie jest to możliwe przy zetknięciu z krytycznymi wymaganiami jakościowymi *CTQ* jak w standardach *NATO*. Wydaje się, że wymagania te zostały przyjęte bez dostatecznej wiedzy o potrzebach i stanie technologii. Można śmiało powiedzieć, że klasyczne wymagania obowiązujące w Polsce przed przystąpieniem do *NATO* były bardziej pragmatyczne, z wyłączeniem problematyki bezpieczeństwa pożarowego.
2. Ze względu na stosunkowo niski stan zdolności procesu otrzymywania, utrzymywania i dystrybucji powietrza oddechowego przeznaczonego na tlenowe warunki hiperbaryczne nie można zrezygnować z laboratoryjnej kontroli jakości.
3. Inwestowanie w modernizację i rotowanie moralnie przestarzałej techniki nie przynosi obecnie skoku w zwiększeniu zdolności procesu otrzymywania, utrzymywania i dystrybucji powietrza oddechowego przeznaczonego na tlenowe warunki hiperbaryczne.

Wydaje się wręcz niewiarogodne, że na aktualnym etapie rotacji urządzeń zastąpienie systemów nowszymi nadal nie przynosi gwałtownych skoków jakościowych z punktu widzenia procesu otrzymywania, utrzymywania i dystrybucji powietrza oddechowego przeznaczonego na tlenowe warunki hiperbaryczne w *Siłach Zbrojnych RP*. Prawdopodobnie działa tu współczynnik skali, gdyż dzisiejsze inwestycje stanowią mały ułamek w stosunku do liczby eksploatowanych urządzeń.

BIBLIOGRAFIA

1. Woźniak A. Uzdatnianie powietrza do celów hiperbarycznych. Polish Hyperbaric Research. 3, 2014, 48, strony 49-58. [HTTP://DX.DOI.ORG/10.13006/PHR.48.4](http://dx.doi.org/10.13006/PHR.48.4).
2. NO-07-A005. Nurkowanie w celach militarnych. Czynniki oddechowe. Klasyfikacja, wymagania i badania. Warszawa : WCNJK, 2010.
3. Klos R. Aparaty Nurkowe z regeneracją czynnika oddechowego. Poznań : COOPgraf, 2000. ISBN 83-909187-2-2.
4. Klos R. Systemy podtrzymania życia na okręcie podwodnym. Gdynia : Polskie towarzystwo medycyny i Techniki Hiperbarycznej, 2008. str. 163. ISBN 978-83-924989-4-0.
5. European Co-operation for Accreditation EAL. Expression of the uncertainty of measurements in calibration. : Task Force Committee 2, December 1999. EA-4/02.
6. Dowództwo Marynarki Wojennej. Instrukcja o wojskowym ratownictwie morskim Marynarki Wojennej. Gdynia : Marynarka Wojenna RP, 2012. Sygn. Mar. Woj. 1361/2012 DMW.
7. Wrzos B. Wytwarzanie i charakterystyka gazowych mieszanin specjalnego przeznaczenia. Gdańsk : Politechnika Gdańska, 2011. Praca doktorska.
8. Marynarka Wojenna RP. Normy należności sprzętu i wyposażenia naliczeniowego Ratownictwa Morskiego MW. Warszawa : brak nazwiska, 2014.
9. Woźniak A. Analiza procesu otrzymywania powietrza oddechowego do celów hiperbarycznych. Gdynia : PTMiTH, 2017. ISBN 978-83-938-322-4-8.
10. Woźniak A. Uzdatnianie powietrza oddechowego do celów hiperbarycznych cz.II. Polish Hyperbaric Research. 1, 2015, 50, strony 31-46. DOI:10.1515/phr-2015-0023.
11. Montgomery D.C. Statistical quality control. 6th Edition. New York : John Wiley & Sons Inc., 2009. ISBN 978-0-470-16992-6.
12. Gerber A. Statystyczne sterowanie procesami-doskonalenie jakości z pakietem Statistica. Kraków : Stat Soft, 2000. ISBN 83-912346-2-2.
13. Automotive Industry Task Force. Measurement systems analysis Reference Manual. Fourth Edition.: Chrysler Group LLC, Ford Motor Company, General Motors Corporation, 2010. ISBN 978-1-60-534211-5.
14. Klos R. Ocena wiarygodności systemu pomiarowego. Polish Hyperbaric Research. 2015, Tom 51, 2. <http://dx.doi.org/10.1515/phr-2015-0009>.

dr inż. Arkadiusz Woźniak
Zakład Technologii Prac Podwodnych
Akademii Marynarki Wojennej
ul. Śmidowicza 69
81-103 Gdynia
tel.261262746
ar.wozniak@amw.gdynia.pl

¹ Standardization Agreement – stanowi umowę, która określa procesy, przepisy, warunki dla wspólnych militarnych/technicznych procedur i wyposażenia,
² STANAG 1458 Diving Gas Quality,
³ STANAG 1372 ADivP-01(B) Allied Guide to Diving Operations,
⁴ Kontekst rozumiany jest tutaj jako otoczenie systemowe, czyli nadsystem do systemu zapewnienia odpowiedniej jakości powietrza oddechowego,
⁵ Critical to Quality,
⁶ Statistical Process Control,
⁷ (D-Define)definiuj, (M-Measure) zmierz, (A-Analyze) analizuj, (I-Improve) doskonal, (C-Control) kontroluj,
⁸ Standard Operational Procedures,
⁹ (S-Strengths) mocne/(W-Weakness) słabe strony, (O-Opportunities) szanse, (T-Threatens) zagrożenia,
¹⁰ Quality Function Deployment,
¹¹ Failure Mode and Effects Analysis,
¹² Statistical Process Control,
¹³ Zastosowanie wybranych kart kontrolnych procesu oraz oszacowanie wskaźników zdolności procesu,

- ¹⁴ Zrezygnowano z metod statystycznego projektowania eksperymentów ze względu na stosunkowo dobrze poznane mechanizmy i modele zachodzących podczas eksperymentów zmian,
- ¹⁵ Faza algorytmu postępowania,
- ¹⁶ Nadsystemu,
- ¹⁷ Za które przyjęto dziesięć podstawowych warunków: rzetelność/dokładność, aktualność, adekwatność, kompatybilność, bezobsługowość, wydajność, niezawodność, mobilność, doświadczenie/SOP, redundancję,
- ¹⁸ Quality Function Deployment,
- ¹⁹ Diagnoza rozumiana jest tutaj jako sformułowanie wniosków dotyczących stanu systemu na podstawie badania zachodzących w nim i na nim procesów lub jedynie efektów ich działania, pozwalająca z reguły na sformułowanie prospektywnych rekomendacji,
- ²⁰ Failure Mode and Effects Analysis,
- ²¹ Spodziewanych jest wiele interakcji,
- ²² Stwarzające w przeszłości najwięcej problemów w procesie zapewnienia jakości dla powietrza hiperbarycznego, ze względu na największą liczbę występujących przekroczeń zawartości CO₂ oraz H₂O w laboratoryjnych badaniach okresowych,
- ²³ SECURUS Bauer System,
- ²⁴ Statistical Process Control,
- ²⁵ DGT (LCL) – dolna granica tolerancji,
- ²⁶ GGT (UCL) – górna granica tolerancji,
- ²⁷ Gdy dane pomiarowe nie podlegają rozkładowi normalnemu należy dopasować inny rozkład lub wykonać ich transformacje np. Johnsona, Boxa-Coxa,
- ²⁸ Anderson-Darling test,
- ²⁹ Control Chart,
- ³⁰ Moving Range – karta ruchomego rozstępu, gdzie rozstęp to wartość bezwzględna różnicy pomiędzy dwoma kolejnymi pomiarami w sąsiednich próbkach,
- ³¹ Górna linia kontrolna,
- ³² Należy przez to rozumieć, że zostały skompensowane błędy systematyczne, a w procesie można jedynie zaobserwować błędy przypadkowe przy stosowanych dokładnościach prowadzenia obserwacji,
- ³³ Górna granica ostrzegania $\geq 2 \cdot \bar{s}$,
- ³⁴ W skrajnie niewydolnych procesach, jeśli poprawa wskaźnika C_p jest niemożliwa, należy podjąć działania w celu całkowitej zmiany procesu, np. poprzez wymianę maszyny,
- ³⁵ Poprawa wskaźnika C_{pk} zazwyczaj jest możliwa do realizacji przez operatora,
- ³⁶ 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 wartości wskaźników zdolności na poziomie co najmniej $C_p, C_{pk} > 1,67$,
- ³⁷ Np. po zakupie i montażu,
- ³⁸ Np. przed rozpoczęciem produkcji seryjnej,
- ³⁹ Wskaźniki kontrolne po odrzuceniu dwóch pomiarów błędnych (błąd obsługi),
- ⁴⁰ Awaria urządzenia,
- ⁴¹ Nie wyklucza to prowadzenia wnioskowania opartego na rozkładach teoretycznych,
- ⁴² Miara jakości w 6σ tzw. Sigma quality level,
- ⁴³ Final Yield,
- ⁴⁴ Defects per million opportunities,
- ⁴⁵ Throughput Yield,
- ⁴⁶ Udział niezgodności można rozpatrywać w kontekście nadplanowych nakładów finansowych związanych z wymaganym wykonaniem ponownej analizy kontrolnej po korekcy systemu.