

OCENA SKUTECZNOŚCI ŹRÓDEŁ ZASILANIA I UKŁADÓW FILTRACJI W PROCESIE UZDATNIANIA POWIETRZA ODDECHOWEGO

Arkadiusz Woźniak

Zakład Technologii Prac Podwodnych, Akademii Marynarki Wojennej w Gdyni

STRESZCZENIE

Określenie skuteczności oczyszczania powietrza oddechowego przeznaczonego do stosowania w celach hiperbarycznych poprzez zastosowanie systemów filtracji jest istotne zarówno z teoretycznego i praktycznego punktu widzenia. Jakość powietrza oddechowego oraz otrzymywanych na jego bazie mieszanin oddechowych ma kluczowe znaczenie ze względu na bezpieczeństwo nurków. Paradoksalnie, zmiana przepisów dotyczących wymagań jakościowych dla czynników oddechowych, wymusiła konieczność weryfikacji bazy technicznej i laboratoryjnej wykorzystywanej do ich produkcji i weryfikacji. W niniejszym materiale, który jest kontynuacją wcześniejszych publikacji przedstawiono wyniki badań i ocenę skuteczności układów filtracji eksploatowanych w MW RP źródeł zasilania powietrzem oddechowym.

słowa kluczowe: technologia prac podwodnych, inżynieria morska, nurkowe czynniki oddechowe.

ARTICLE INFO

PolHypRes 2015 Vol. 53 Issue 4 pp. 55-74

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

DOI: 10.1515/phr-2015-0023

Strony: 21, rysunki: 23, tabele: 3

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

Typ artykułu: oryginalny

Termin nadesłania: 05.09.2015r.

Termin zatwierdzenia do druku: 05.11.2015r.

Publisher

Polish Hyperbaric Medicine and Technology Society



WSTĘP

Niewydolność zaopatrywania Systemu Wojskowego Ratownictwa Morskiego MW [1] czynnikami oddechowymi o wymaganej jakości spowodowała ograniczenie możliwości prowadzenia szkolenia specjalistycznego i wykonywania prac podwodnych w SZRP¹ [2,3].

Ograniczenia systemu wynikające z braku zapewnienia właściwej jakości były spowodowane m.in. wykorzystaniem wyeksploatowanych źródeł zasilania oraz niewystarczającą konfiguracją systemu uzdatniania powietrza oddechowego. Stosowanie filtrów oczyszczających wypełnionych np. tylko jednym z rodzajów substancji absorbujących² i adsorbujących³ (np. węgiel aktywny lub wapno sodowane) bez udziału automatyki sterującej odwadnianiem nie mogło zapewnić oczekiwanej jakości [4].

CEL I METODA BADAŃ

Celem badań było dokonanie oceny wpływu wprowadzonych modyfikacji systemu uzdatniania powietrza oddechowego źródeł zasilania eksploatowanych w MWRP⁴ na jakość otrzymywanego powietrza oddechowego. Określenie oddziaływania zastosowanych wymuszeń na proces produkcji pozwoli na wytypowanie rozwiązań technicznych zapewniających najwyższą jakość uzyskiwanego powietrza oddechowego.

W wyniku dotychczas prowadzonych prac [5] zidentyfikowano zestaw zmiennych wejściowych ($X_1...X_5$) przedstawionych w tab.2 mających wpływ na układ filtrujący, a zatem na wyodrębniony obiekt badań w rozpatrywanym procesie uzdatniania powietrza oddechowego. Przeprowadzono eksperyment [5] mający na celu uzyskanie informacji dotyczącej efektywności zastosowania wybranego układu filtrującego P61 BAUER z wkładem filtrującym (MS/MS/AC⁵/MS⁶/HP⁷) wraz ze sprężarką EK2-150.

Zastosowanie nowego wypełnienia układu filtrującego spowodowało wielokrotne obniżenie zawartości poszczególnych domieszek szkodliwych w uzyskanym powietrzu w stosunku do wartości pierwotnych [5]. Obiecujące wyniki pomiarów, które uzyskano w badaniach modelowych [5] należało zweryfikować w oparciu o ich zastosowanie w różnych typach źródeł zasilania eksploatowanych w MW RP. Dalsze pomiary prowadzono w kierunku oceny odpowiedzi systemu określającej stopień skuteczności wytypowanych układów filtrujących.

W badaniach zastosowano wielowariantowe podejście polegające na wykorzystaniu różnego rodzaju źródeł zasilania i konfiguracji układów filtrujących. W procesie produkcji powietrza oddechowego analizie fizykochemicznej poddawana jest próbka pobrana na wylocie źródła zasilania za układem filtrującym. W próbce oznacza się zgodnie z wymaganiami [6,7] zawartość tlenu (O_2) i azotu (N_2) oraz poszczególnych domieszek szkodliwych takich jak (H_2O , CH_4 , CO_2 , CO , NO_2 i NO). Poniżej zgodnie z wcześniej uzyskanymi wynikami badań [4,5] w tab.1 przedstawiono częstość występowania wyników negatywnych w latach 2002-2003.

Tab. 1.

Zestawienie przyczyn odrzutów analizy powietrza oddechowego w latach 2002-2003(do III.kw). Źródło: opracowanie własne.

lp.	Rodzaj zanieczyszczenia	Częstość występowania wyniku niespełniającego wymagań w [%]
	H ₂ O	88.96
	CO ₂	20.94
	CO	7.56
	CH ₄	5.24
	O ₂	1.75
	NO ₂	0

Do badań poszczególnych źródeł zasilania wykorzystano układy uzdatniania powietrza oddechowego typoszeregu firmy BAUER. Założono, że przedstawione w tab.2 zidentyfikowane przyczyny odrzutów grupy A mają wpływ na przebieg procesu.

Tab. 2.

Zidentyfikowane wartości wejściowe procesu uzdatniania powietrza oddechowego. Źródło: opracowanie własne.

symbol	Wartość wejściowa(zmienna)	Grupa
X_1	residual oil content at supply output	A
X_2	physical-chemical properties and filter cartridge composition	
X_3	water-oil separator	
X_4	measurement accuracy of the chemical composition of the breathing air	
X_5	pollution content in atmospheric air	

Przyjęto, że do określonej grupy A zmiennych (X_1 - X_5) wywierających najbardziej negatywny wpływ kwalifikują się przyczyny powodujące 80% negatywnych skutków [8]. Bez wykonania dalszych badań trudno jest jednak określić stopień i skalę ich pozytywnego lub negatywnego oddziaływania na proces uzdatniania powietrza.

Ze względu na dużą skalę występowania odrzutów (tab.1) należało podjąć działania mające na celu korygowanie niestabilnego (rozregulowanego) procesu produkcji powietrza oddechowego poprzez eliminację poszczególnych przyczyn rozregulowania. Dokonanie docelowej korekcji przy wykorzystaniu różnego rodzaju narzędzi związanych ze sterowaniem i zapewnieniem jakości było zdezeterminowane wykonaniem oceny skuteczności zastosowanych zmian w oparciu o uzyskane wyniki pomiarów laboratoryjnych.

Do oceny jakościowej powietrza oddechowego wykorzystano pobrane próbki powietrza oddechowego, które poddano analizie fizykochemicznej. Badania laboratoryjne pobranych próbek zostały przeprowadzone pod nadzorem Szefostwa Ratownictwa Morskiego DMW (SRMDMW) w laboratorium fizykochemicznym Centralnego Zakładu Sprzętu Ratowniczego MW (CZSR MW). W celu zagwarantowania odpowiedniej jakości ocenę procesu pomiarowego [9,10,11] w laboratorium przeprowadzono przy współudziale Zakładu Technologii Prac Podwodnych AMW (ZTPP AMW). Analiza systemu pomiarowego kontrolowanego procesu była warunkiem kluczowym dla zapewnienia miarodajnej oceny sterowania procesem technicznym.

Do prowadzenia pomiarów laboratoryjnych wykorzystywano m.in. metodę chromatografii gazowej umożliwiającą ustalenie procentowego składu powietrza oddechowego zgodnie z wymaganiami NO-07-A005. Do wykonywania pomiarów stosowano chromatografy gazowe GC 8160 firmy FISIONS z detektorem FID⁸ oraz TCD oraz TRACE ULTRA GC firmy Thermo Fisher Scientific odpowiednio w konfiguracjach z detektorem FID i TCD oraz PDD⁹ i TCD.

Chromatografia gazowa wraz ze spektrometrią należy do najczęściej stosowanych metod analizy powietrza oddechowego i innych mieszanin oddechowych. Do pomiarów zawartości zanieczyszczeń wykorzystano również spektrometry NICOLET ANTARIS IGS FTIR¹⁰ firmy Thermo Fisher Scientific. Zastosowane w badaniach wyposażenie laboratoryjne przedstawiono poniżej na rys. 1-4.



Rys. 1-2. Chromatografy gazowe GC 8160 FISIONS i TRACE Ultra GC, Thermo Fisher Scientific.



Rys. 3-4. Spektrometr FTIR. NICOLET ANTARIS Thermo Scientific wraz z cyrkonowym analizatorem tlenu RAPIDOX 2100ZF.

Poszerzenie o zmienną X_1 (tab.2) grupy wprowadzanych zmiennych wejściowych w trakcie wykonanych badań, pozwoliło na ocenę skali wpływu rodzaju źródła zasilania na proces uzdatniania powietrza.

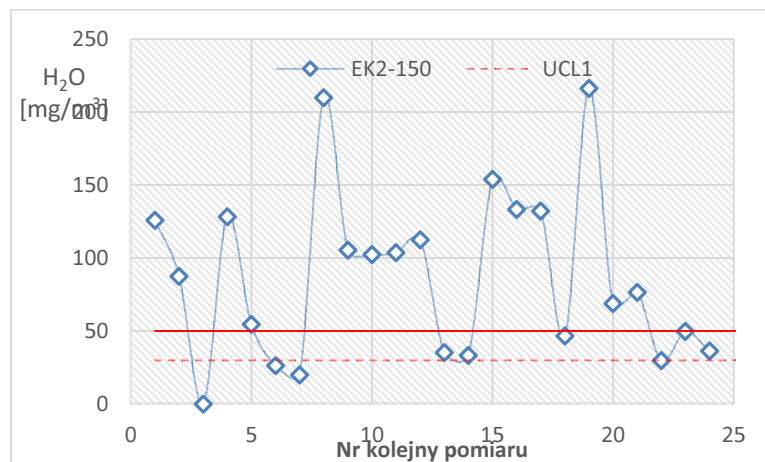
W celu optymalizacji procesu w badaniach zdecydowano się na uwzględnienie konstrukcji nowej generacji dotychczas niestosowanych w MWRP. Umożliwiło to dokonanie wyboru wydajnych i niezawodnych systemów produkcji powietrza oddechowego. Wyniki prac będą stanowiły podstawę do wymiany nie podatnych na modernizację i wyeksploatowanych źródeł zasilania. Szybkie osiągnięcie znacznej poprawy jakościowej w badanej populacji około 100-140 różnorodnych źródeł zasilania nie jest możliwe tylko w oparciu o modernizację starych systemów.

Planowane działania miały na celu uzyskanie wysokiej jakości powietrza oddechowego i doprowadzenie do zmniejszenia wartości wyjściowych C_i^{11} do poziomu zawierającego się w granicach określonych wymaganiami [6,7]. Dzięki wykonanym badaniom oraz stworzeniu bazy danych wykonywanych pomiarów ułatwiono możliwość dokonania okresowej analizy prowadzonych prac a przez to oceny uzyskanych efektów po zastosowaniu wymuszeń X_1 - X_5 . Wyniki pomiarów zgromadzone w formie stabelaryzowanej bazy danych opracowano przy wykorzystaniu oprogramowania MINI TAB Release 14, Statistical Software oraz Microsoft EXCEL.

BADANIA

Decyzję dotyczącą poziomu inwestycji związanych z sukcesywną modernizacją lub wymianą źródeł zasilania oparto

na wynikach badań wykonanych w ramach analizy skuteczności źródeł zasilania, której wyniki przedstawiono poniżej. Przedstawiona analiza obejmuje lata 2002-2013. W celu wyboru kierunku prac modernizacyjnych na wczesnym etapie prowadzenia prac odniesiono się do uzyskanych wyników w latach 2002-2005, które częściowo ujęte są na przedstawionych poniżej grafach. Na wykresach przedstawiono uzyskane wyniki pomiarów zawartości H₂O w badanych próbkach powietrza oddechowego dla różnych źródeł zasilania i układów filtracji. Na rys.5 przedstawiono pierwotny rozkład pomiarów zawartości wilgoci dla sprężarki EK2-150 w której nie zastosowano wymuszeń.



Rys. 5. Wykres dla kolejnych obserwacji pomiarów zawartości H₂O w powietrzu oddechowym sprężarki EK2-150 dla stanu 1 w latach 2002-2007 źródło: opracowanie własne na podstawie badań laboratorium fizykochemicznego CZSRMW oraz bazy danych pomiarowych WRTMiPP SRMDMW¹².

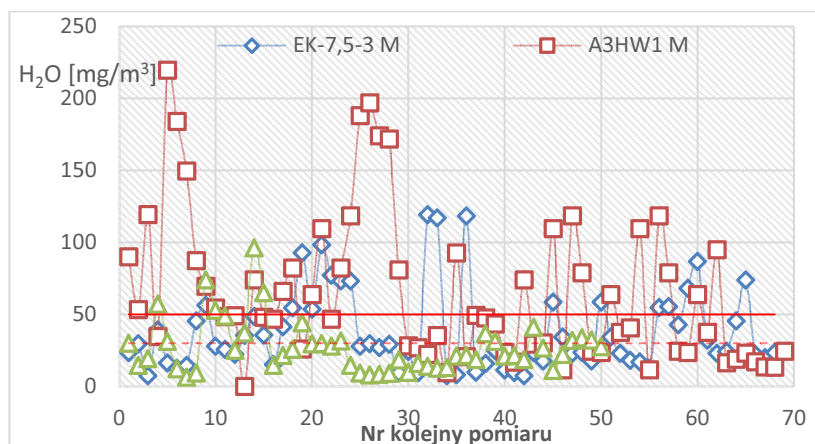
Jak widać rozkład wyników pomiarów w ramach rozpatrywanego procesu znajduje się w bardzo dużych granicach. Należy zauważyć, że wyniki pomiarów w znacznej mierze leżą poza określonymi granicami tolerancji procesu i w 16 przypadkach, co stanowi 66,6% całości pomiarów nie spełniają stawianych wymagań.

Zachowanie systemu jest dość przypadkowe, charakteryzuje się dużym rozproszeniem, wydajność procesu z punktu widzenia użytkownika jest niezadawalająca. Oznacza to, że, wydzielone elementy systemu (tj. filtr, sprężarka itp.) pomimo wzajemnego oddziaływania na siebie nie gwarantują osiągnięcia założonych minimów funkcji celu C_i , który określono dla wilgoci jako zawartość H₂O ≤ 50 mg/m³. Dlatego też skoncentrowano się na uzyskaniu właściwego położenia wartości \bar{X} pomiarów dla poszczególnych domieszek szkodliwych (H₂O, CH₄, CO₂, CO, NO₂ i NO) powietrza oddechowego (C_i), która powinna znajdować się w wyznaczonych granicach kontrolnych. Przyjmując, że odchylenie standardowe populacji jest równe σ to odchylenie standardowe rozkładu wartości średnich wynosi $\sigma_{\bar{x}} = \frac{\sigma}{\sqrt{n}}$ [8]. Rozproszenie wyników pomiarów nie powinno przekraczać granic kontrolnych znajdujących się w odległości $\pm 3\sigma_{\bar{x}}$ od wyznaczonej linii centralnej. Granice kontrolne wyznaczają zakres przedziału w którym zgodnie z zasadą 3σ wynikającą z własności rozkładu normalnego powinno znajdować się 99,73% wszystkich pomiarów.

Dla porównania jakości uzyskiwanych wyników pomiarów na kolejnych wykresach przedstawiono wyniki badań laboratoryjnych uzyskanych dla systemów poddanych modyfikacji po wprowadzeniu zmian X₂-X₅ (stan 2) [5] oznaczonych na wykresach symbolem „M” lub nowej generacji źródeł zasilania (X₁) wraz z układami uzdatniania powietrza oddechowego. Poniżej na rys.6 przedstawiono porównanie dla 3 typów źródeł zasilania:

- zmodernizowanych sprężarek typu EK-7,5M oraz A3HW1 M;
- nowej sprężarki MARINER 250E;

w odniesieniu do granic kontrolnych odpowiadających kl. I i kl. II wymaganej jakości powietrza oddechowego.



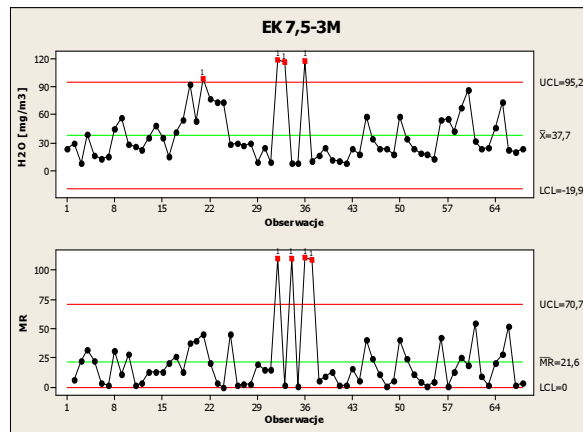
Rys. 6. Wykres dla kolejnych obserwacji pomiarów zawartości H₂O w powietrzu oddechowym dla różnych źródeł zasilania w latach 2002-2013. Źródło: opracowanie własne na podstawie badań laboratorium fizykochemicznego CZSRMW oraz bazy danych pomiarowych WRTMiPP SRMDMW.

Na wykresie można dostrzec znaczną różnicę w zakresie zastosowanych rozwiązań technicznych. Z analizy wyników pomiarów widać, że najbardziej efektywnym rozwiązaniem było zastosowanie wymuszeń X_1 - X_5 (MARINER 250E). Zastosowane wymuszenia X_2 - X_5 (dla sprężarki EK-7,5-3 M) nie są już tak bardzo efektywne. Wyniki pomiarów uzyskane dla sprężarki A3HW1 M odbiegają znacznie, od uzyskanych zarówno dla MARINER 250E jak i EK-7,5-3M.

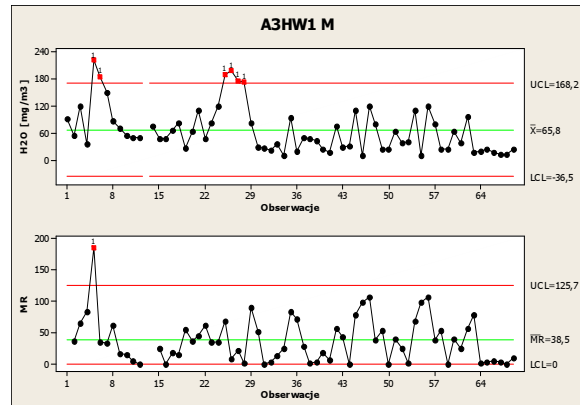
W ramach kontroli procesu produkcji powietrza oddechowego każdy rodzaj źródła zasilania badanej populacji rozpatrywano indywidualnie. Do prowadzenia kontroli wykorzystano metodę statystycznego zarządzania jakością SPC¹³ realizowaną za pomocą kart kontrolnych.

Karty kontrolne służyły monitorowaniu jakości procesu poprzez kontrolę położenia i zmienności wyników pomiarów względem określonych granic tolerancji. Poniżej przedstawiono uzyskane wyniki pomiarów, które naniesiono na kartę kontrolną IX-MR¹⁴ dla procesu uzdatniania powietrza oddechowego dla poszczególne rozpatrywanych źródeł zasilania. Na rys.7 i 8 przedstawiono rozkład danych pomiarowych na karcie kontrolnej dla źródeł zasilania typu: EK-7,5-3 M i A3HW1 M.

Wykorzystanie statystycznego sterowania procesem produkcyjnym [12,13] w procesie wytwarzania powietrza oddechowego pozwala na zastosowanie odpowiedniej metodyki w celu udoskonalenia procesu poprzez zminimalizowanie wielkości występującego rozrzutu i centralizację procesu do określonych wartości docelowych.



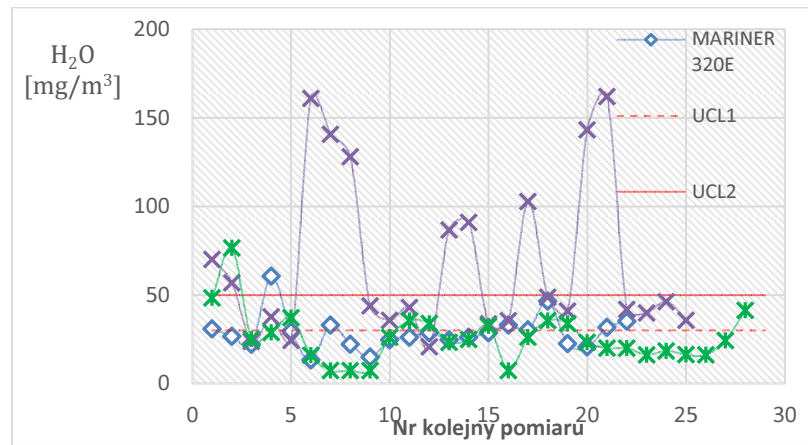
Rys. 7. Rozkład danych pomiarowych uzyskanych dla sprężarki EK-7,5-3M.



Rys.8. Rozkład danych pomiarowych uzyskanych dla sprężarki A3HW1 M. Źródło: opracowanie własne na podstawie badań laboratorium fizykochemicznego CZSRMW oraz bazy danych pomiarowych WRTMiPP SRMDMW.

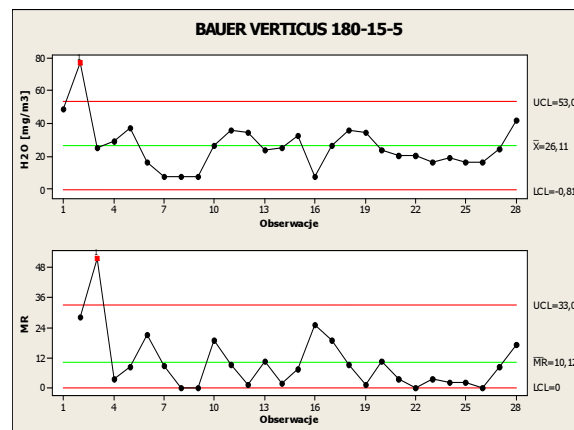
Z analizy wyników na kartach kontrolnych IX-MR widać, że pomiary uzyskane dla sprężarki A3HW1 M znacznie odbiegają jakościowo od wyników uzyskanych ze sprężarki EK-7,5-3 M, gdzie zachowanie się i rozkład danych pomiarowych jest mniej rozproszony. Skuteczność oczyszczania powietrza oddechowego w sprężarce zmodernizowanej jest wyższa a zatem układ uzdatniania powietrza oddechowego jest bardziej skuteczny.

Na kolejnym rys.9 przedstawiono wyniki pomiarów zebrane dla innych źródeł zasilania i modyfikacji systemu oczyszczania powietrza oddechowego typu: MARINER 320E, VERTICUS BAUER 150-15-05 oraz EK-2-150 M.



Rys. 9. Wykres dla kolejnych obserwacji pomiarów zawartości H₂O w powietrzu oddechowym dla różnych źródeł zasilania w latach 2002-2013. Źródło: opracowanie własne na podstawie badań laboratorium fizykochemicznego CZSRMW oraz bazy danych pomiarowych WRTMiPP SRMDMW.

Uzyskane wyniki pomiarów dla sprężarki typu: VERTICUS BAUER 150-15-05 zapewniającej uzyskanie jakości powietrza oddechowego o najwyższej jakości przedstawiono poniżej na karcie kontrolnej IX-MR [8] dla procesu produkcji powietrza oddechowego (rys.10).



Rys. 10. Rozkład danych pomiarowych uzyskanych dla sprężarki BAUER VERTICUS 180-15-5. Źródło: opracowanie własne na podstawie badań laboratorium fizykochemicznego CZSRMW oraz bazy danych pomiarowych WRTMiPP SRMDMW.

Jak widać różnice, w jakości uzyskiwanego powietrza oddechowego przy zastosowaniu zarówno nowego źródła zasilania jak i układu filtrującego (grupa 3) znacznie przewyższają, jakość powietrza uzyskiwana w starych systemach (grupy 1) lub ich zmodernizowanych wersjach¹⁵ wyposażonych w nowe systemy filtrujące należące do (grupy 2).

Podział ogólny na grupy kontrolne poddane badaniom przedstawiono w tab.3.

Tab. 3

Podział ogólny na grupy kontrolne ze względu na zastosowanie rozwiązanie układu uzdatniania. Źródło: opracowanie własne.

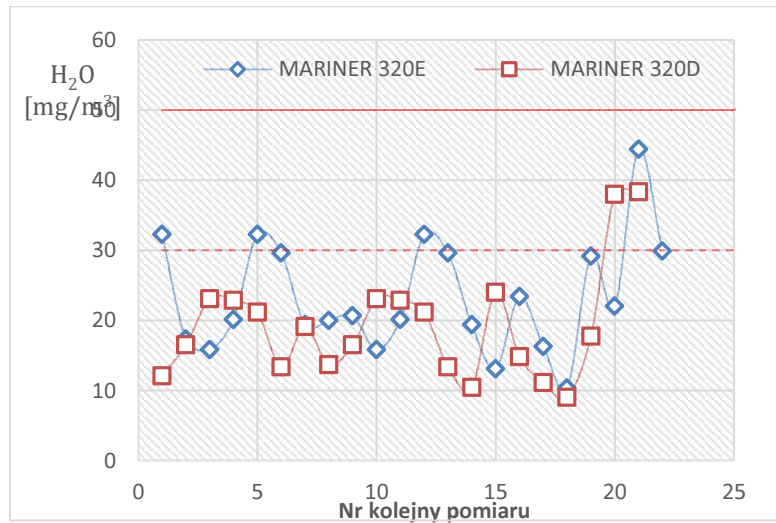
Rodzaj zastosowanego rozwiązania układu uzdatniania powietrza oddechowego	Grupa kontrolna
stary układ filtrujący + stare źródło zasilania	1
nowy układ filtrujący + stare źródło zasilania	2
nowy układ filtrujący + nowe źródło zasilania	3

Występujące różnice jakościowe na kartach IX-MR z (rys.7, 8, 10) są łatwo zauważalne zarówno, co do ilości występujących pomiarów przekraczających określone granice tolerancji jak i położenia linii centralnej CL¹⁶ na karcie kontrolnej CC¹⁷ wartości średnich \bar{X} . Rozkład danych pomiarowych poza granicami tolerancji na karcie \bar{X} , daje istotne informacje, co do ilości i częstotliwości oraz rozmiaru występujących rozregulowań.

W nowych systemach grupy 3 w praktyce przy zachowaniu właściwego podejścia eksploatacyjnego jesteśmy w stanie utrzymać proces wewnątrz określonych granic tolerancji (LCL¹⁸ < proces < UCL¹⁹) a system jest mniej podatny na zakłócenia i wpływ zmiennych niezależnych (np. temperatura i wilgotność powietrza atmosferycznego). Grupa 2 reprezentująca grupę źródeł zasilania poddanych modernizacji jest bardziej wydajna niż grupa 1. Pomimo zastosowania tego samego typu układów filtrujących skuteczność oczyszczania układu uzdatniania powietrza jest różna w zależności od rodzaju źródła.

Oznacza to, że nawet nowoczesne układy filtrujące nie są w stanie zapewnić właściwej jakości przy ich użytkowaniu ich z wyeksploatowanymi źródłami zasilania pozbawionymi automatycznych systemów odwadniania i sterowania. Czas

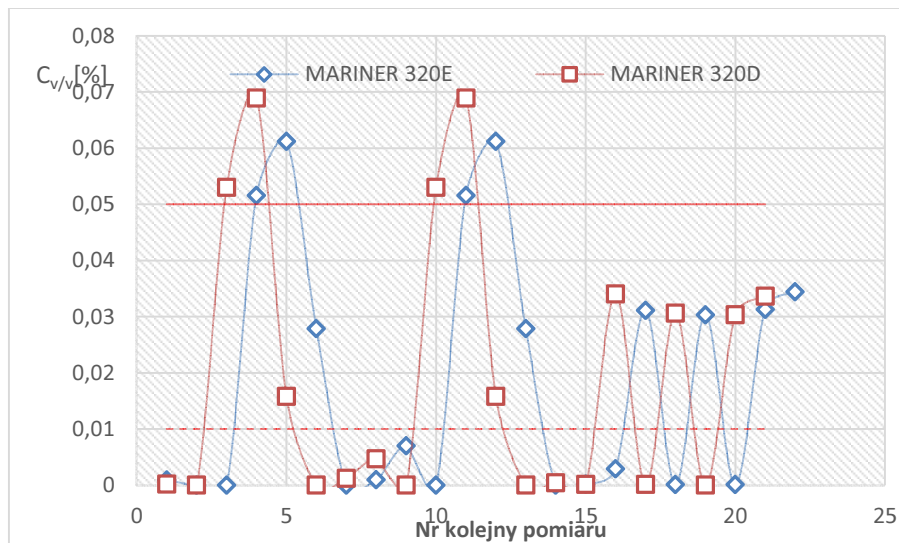
ochronnego działania wkładów filtrujących w takim przypadku ulega również znacznemu skróceniu ze względu na pracę w niesprzyjających warunkach. Poniżej na rys.11 i 12 przedstawiono wyniki kolejnych pomiarów na zawartość H₂O i CO₂ przeprowadzonych dla tego samego rodzaju źródła zasilania wyposażonego w napęd elektryczny i spalinowy.



Rys. 11. Wykres dla kolejnych obserwacji pomiarów zawartości H₂O w powietrzu oddechowym dla MARINER 320D/E w latach 2009-2013. Źródło: opracowanie własne na podstawie badań laboratorium fizykochemicznego CZSRMW oraz bazy danych pomiarowych WRTMiPP SRMDMW.

Należy zauważyć, że efektywność nowych systemów których wyniki pomiarów przedstawiono na rys.11 znacznie odbiega, od jakości uzyskiwanej w badanych grupach 1 i 2. Najbardziej problematyczna zawartość wilgoci (tab.1) w badanych próbkach utrzymuje się poniżej wartości wymaganych, co więcej tylko w kilku przypadkach przekracza wymagania dla kl. I (UCL 1) powietrza oddechowego.

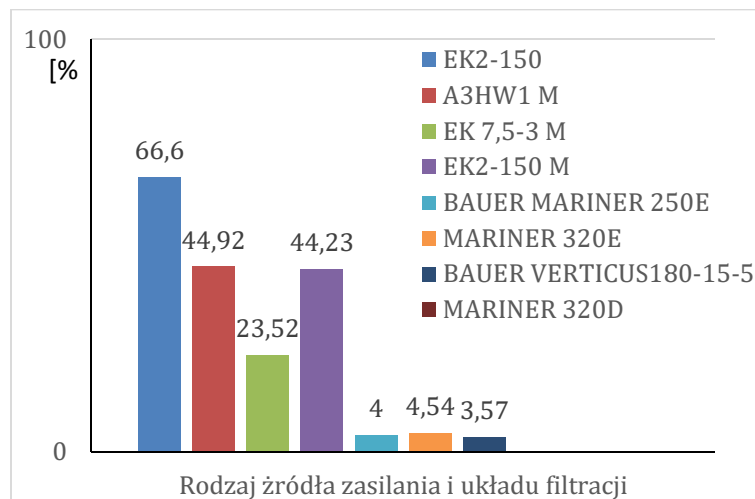
Stabilność i uregulowanie procesu jest na oczekiwanym poziomie pomimo faktu, że w kilku przypadkach uzyskane wyniki pomiarów przewyższają wartości określone dla kl. I (UCL 1).



Rys. 12. Wykres kolejnych obserwacji pomiarów zawartości CO₂ w powietrzu oddechowym dla MARINER 320D/E w latach 2009-2013. Źródło: opracowanie własne na podstawie badań laboratorium fizykochemicznego CZSRMW oraz bazy danych pomiarowych WRTMiPP SRMDMW.

Jak widać wyniki pomiarów uzyskiwane ze sprężarki napędzanej silnikiem spalinowym zawsze nieco przewyższają wartości pomiarów sprężarki zasilanej silnikiem elektrycznym. Zastosowanie wkładu hopkalitowego, wapna sodowanego²⁰ i węgla aktywowanego w układzie filtrującym nie w pełni kompensuje wpływ zanieczyszczenia powietrza. Źródła zasilania napędzane silnikiem elektrycznym w każdym przypadku wykazują mniejszą wartość zawartości CO₂ w badanej próbce.

Zestawienie zbiorcze udziału wyników pomiarów niespełniających wymagań dla kl. II powietrza oddechowego w zakresie zawartości H₂O dla grup kontrolnych 1-3 przedstawiono poniżej na rys.13.



Rys. 13. Wykres procentowego udziału wyników niespełniających wymagań dla zawartości H₂O w zależności od źródła zasilania i zastosowanego systemu filtracji. Źródło: opracowanie własne.

Jak widać efektywność poszczególnych systemów można podzielić na 3 odrębne grupy. Najbardziej skutecznym jest zastosowanie rozwiązań grupy 3 (od 0 do 4,54% udziału wyników negatywnych), kolejnym jest grupa 2 w zależności od rozwiązania technicznego (od 23,52 do 44,92 % udziału wyników negatywnych) najmniej skutecznym jest grupa 1 (66,6% odrzuconych próbek).

Wynika z tego, że, zastosowanie rozwiązań polegających na wykorzystaniu nowego wkładu filtrującego i starego źródła zasilania przynosi oczekiwany skutek polegający na zmniejszeniu udziału odrzutów z 66,6 % do 44,23% dla tego samego rodzaju sprężarki (EK 2-150 M). Ponadto należy stwierdzić, że rozwiązanie techniczne zastosowane w grupie 3 przynosi najbardziej oczekiwany skutek, ale wymaga też dużych nakładów finansowych.

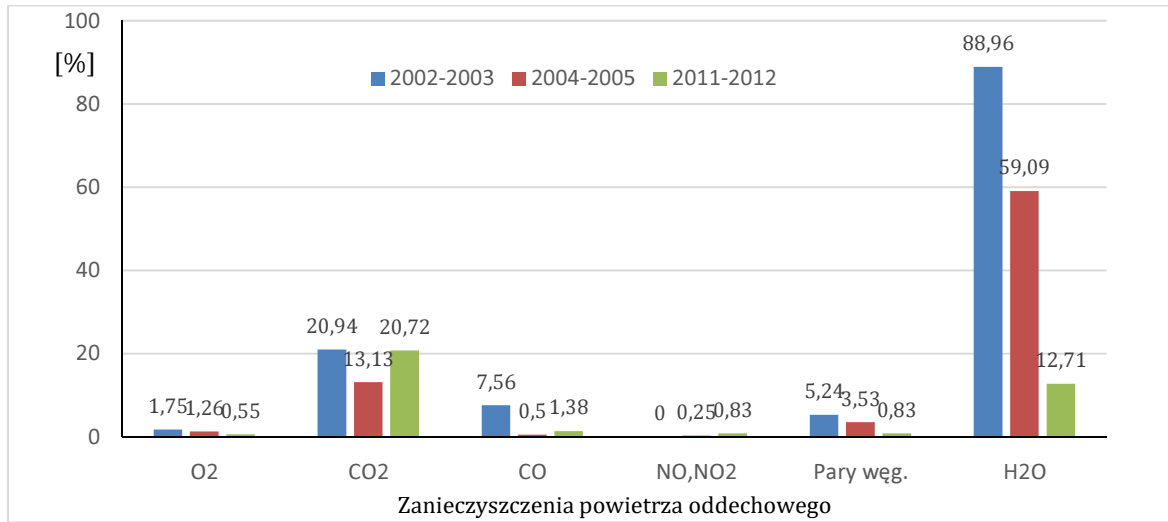
W celu rozwiązania sytuacji problemowej zastosowanie w okresie przejściowym rozwiązań grupy 2 może zmniejszyć ilość odrzutów a w konsekwencji zredukować nakłady finansowe na wykonanie ponownych analiz fizykochemicznych. Umożliwi to wykorzystanie tych środków na sukcesywną modernizację systemów uzdatniania powietrza oddechowego i wprowadzanie do eksploatacji nowych typów źródeł zasilania.

W niektórych rozpatrywanych przypadkach dobór nowej generacji wkładów filtrujących spowodował efektywne zmniejszenie udziału wyników odrzuconych do około 24% w przypadku sprężarek E,K-7,5-3 M. Uzyskanie stosunkowo niskiego poziomu odrzutów daje możliwość kontynuacji eksploatacji wymienionego typu sprężarek bez konieczności ich wymiany przed upływem nominalnego okresu eksploatacji.

Poziom uzyskanych wyników dla grupy 3 znajduje się dużo poniżej założonej wartości 20%. Modernizację sprężarek EK2-150 M oraz A3HW1 M nie są tak efektywne jak EK-7,5-3 M dają jednak możliwość uzyskania poprawy jakości powietrza oddechowego w procesie produkcyjnym przy stosunkowo niewielkich nakładach finansowych w porównaniu do zakupu nowych źródeł zasilania. Porównując uzyskane wyniki można stwierdzić, że najbardziej istotne znaczenie na skuteczność działania układu uzdatniania powietrza oddechowego mają bezpośrednio zmienne (X_1, X_2, X_3, X_5) pod warunkiem zapewnienia odpowiedniej dokładności wykonywanych pomiarów laboratoryjnych X_4 . W takim przypadku efektywność i skuteczność oczyszczania układu filtracji znacznie wzrasta.

W nowych rozwiązaniach technicznych np. (WP4330 SAUER @SOHN) zawartość resztkowa oleju na wypływie sprężarki przed skierowaniem powietrza do filtracji w warunkach normalnych tj. w temperaturze 20°C i przy ciśnieniu 1013mbar wynosi około 3÷5ppm. Jest to wartość wielokrotnie mniejsza niż np. w sprężarkach starego typu: EK 2-150.

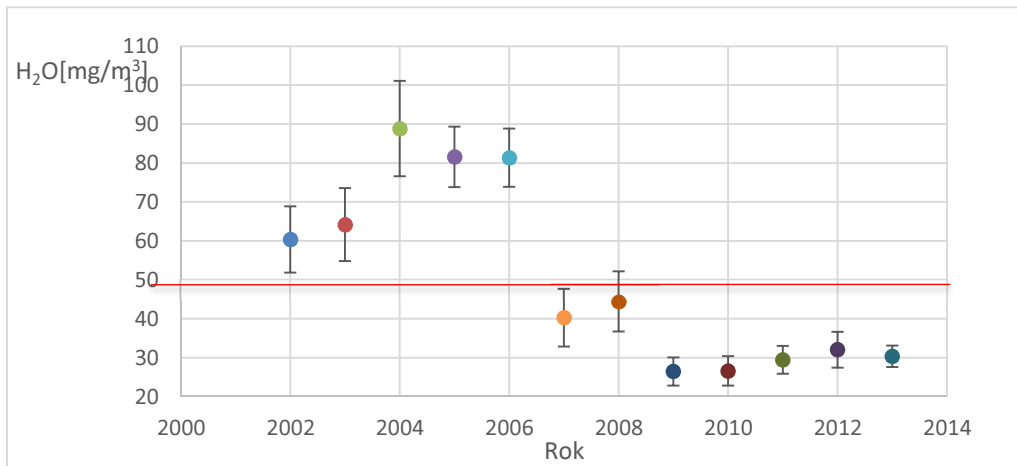
W trakcie realizacji badań w latach 2002-2005 zgromadzono i poddano ocenie wyniki badań laboratoryjnych uzyskanych w laboratorium fizykochemicznym gazów oddechowych Centralnego Zakładu Sprzętu Ratowniczego Marynarki Wojennej, które realizowało chemiczną ocenę jakościową²¹ i ilościową²² powietrza oddechowego²³ zgodnie z wymaganiami. Z przeprowadzonych analiz wyników pomiarów laboratoryjnych wynikało, że jakość powietrza oddechowego przeznaczonego do celów hiperbarycznych dalece odbiegała od stawianych wymagań. Na rys.14 przedstawiono graficznie wyniki tej oceny.



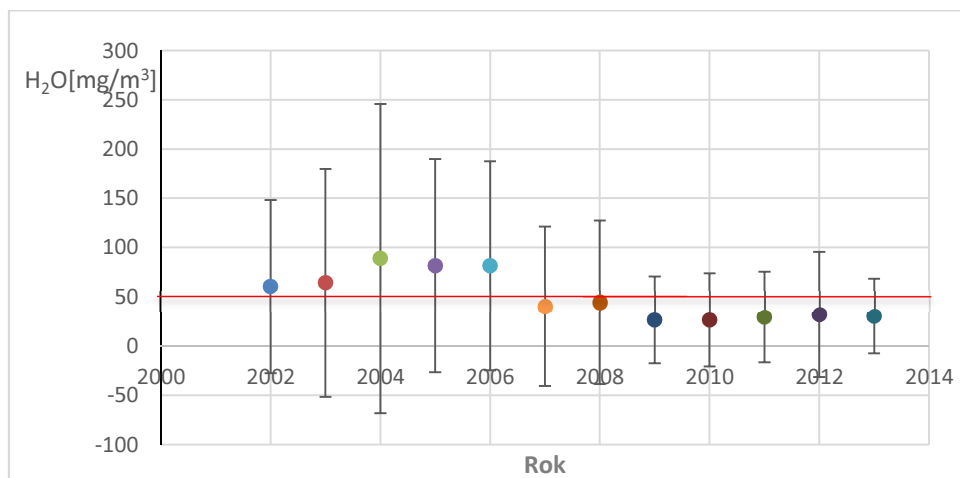
Rys. 14. Udział procentowy wyników badań powietrza oddechowego niespełniających wymagań jakościowych w latach 2002+2012. Źródło: opracowanie własne na podstawie badań laboratorium fizykochemicznego CZSRMW oraz bazy danych pomiarowych WRTMiPP SRMDMW

Na podstawie uzyskanych wyników badań przeprowadzono prace modernizacyjne, które spowodowały w latach 2004-2005 uzyskanie poprawy jakościowej (rys. 14). Kontynuacja prac doprowadziła w latach 2011-2012 do uzyskania satysfakcjonującego poziomu jakościowego, który w konsekwencji spowodował wielokrotne zmniejszenie udziału wyników pomiarów odrzuconych.

Poniżej na rys.15 i 16 przedstawiono zachodzące w procesie zmiany w okresie 10 lat obserwacji (od 2002 do 2013 roku).



Rys. 15. Wykres średnich $\bar{x}_{2002-2013} \pm 0,95$ przedz. ufności dla pomiarów H₂O. Źródło: opracowanie własne.



Rys. 16. Wykres średnich $\bar{x}_{2002-2013}$ wraz z niepewnością rozszerzoną dla rozkładu T-studenta przy $k=1,96$ dla pomiarów H₂O. Źródło: opracowanie własne.



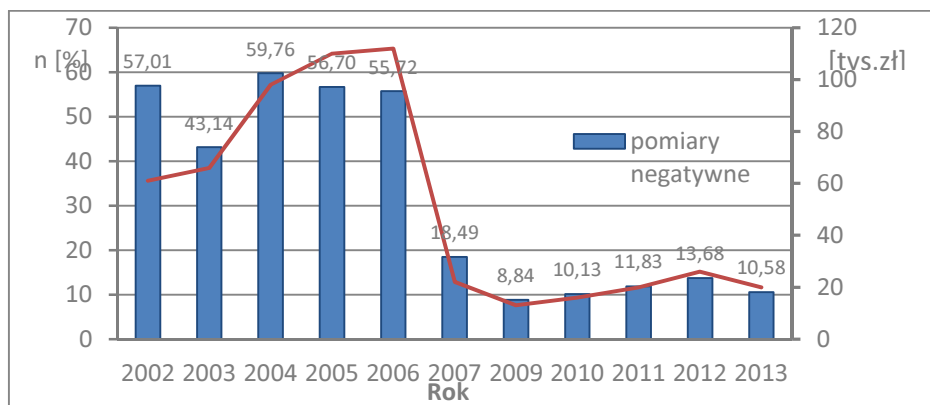
Widać, że naniesione wartości średnie z niepewnością rozszerzoną przy $k=1,96$ przedstawione na rys.16 ze względu na duże rozproszenie w latach 2002-2006 są praktycznie nie rozróżnialne ze względu na dokładności ich wyznaczenia.

Porównując to z rys.15 przedstawiającym wartości średnie z przedziałem ufności 0,95 dostrzegamy pewną różnicę. Uzyskanie odpowiedzi, co do zachowania się rozpatrywanej grupy pomiarów wymagało dalszego wnioskowania w wyniku którego na podstawie wyników badań historycznych wykazano istotną różnicę pomiędzy pomiarami w kolejnych latach. Analiza potwierdziła, że zachowanie się badanej zbiorowości statystycznej nie było przypadkowe a zmiany były spowodowane wprowadzonymi czynnikami deterministycznymi [3].

Na podstawie analizy wartości średnich wraz z określonym przedziałem ufności $\alpha=0,95$ pomiarów badanej populacji wyników w poszczególnych latach można wyodrębnić dwie grupy pomiarów pomiędzy którymi zachodzi różnica tj. Grupa A1(2002-2006) i Grupa B1 (2007-2013). W wyniku przeprowadzonego wnioskowania wykazano istotną zmianę jakościową dla pomiarów H₂O, która nastąpiła w latach 2006-2007.

Warto zauważyć, że od tego czasu uzyskiwane wyniki pomiarów utrzymują się w określonych wymaganiach granicach. Określony punkt zmian pozwala również na ocenę skali poprawy i odpowiedzi systemu na wprowadzone zmiany z uwzględnieniem koniecznych nakładów finansowych. Co istotne rozpatrując przebieg pomiarów w grupie B1 można stwierdzić, że kontynuacja prac modernizacyjnych po roku 2007 nie powodowała już tak istotnych zmian jak obserwowano w wcześniej w grupie A1. Dla dalszej analizy i identyfikacji różnic wariancji w poszczególnych grupach zastosowano analizę jednoczynnikową wariancji dla badanych grup populacji pomiarów.

Dzięki osiągnięciu zamierzonego celu możliwym było zmniejszenie ilości wykonywanych powtórnie pomiarów laboratoryjnych. Poniżej na rys.17 przedstawiono udział procentowy odrzuconych pomiarów w poszczególnych analizowanych latach zgodnie z przyjętym założeniem. Celem działań było zmniejszenie udziału procentowego wyników niespełniających wymagań w badanej populacji danych pomiarowych z 89% (tab.1) do poziomu 20% odrzutów.



Rys. 17. Analiza udziału procentowego frakcji wyników negatywnych „n” dla zawartości H₂O oraz nakładów finansowych związanych z koniecznością wykonania 1 –ej analizy powtórnej dla badanej populacji w latach 2002-2013.

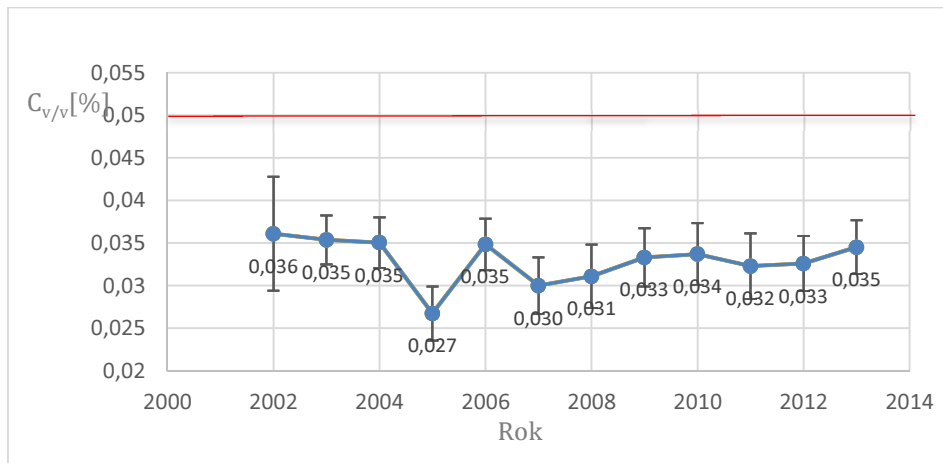
Zmiana jakościowa, która nastąpiła w analizowanym okresie jest bardzo wyraźna. Od roku 2007 wartość określonego udziału frakcji wyników negatywnych „n” mieściła się poniżej poziomu 20% odrzutów. W latach 2009-2013 udział próbek niespełniających wymagań znajduje się w granicach od 8,84-13,68% czyli na poziomie dużo niższym niż oczekiwany. Zmniejszająca się ilość pomiarów negatywnych spowodowała wymierne oszczędności finansowe wynikające z braku konieczności wykonywania ponownych analiz ze źródeł zasilania, które nie spełniały wymagań jakościowych.

Konsekwencją odrzucenia badanej próbki była konieczność wdrożenia działań naprawczych dla badanego układu uzdatniania powietrza. W takim przypadku po usprawnieniu systemu w celu ponownego dopuszczenia do eksploatacji należało dokonać jego ponownej oceny jakościowej [6]. Nie zawsze kolejna analiza była ostateczną. Występowały zdarzenia eksploatacyjne szczególnie w latach 2002-2006 przed wprowadzeniem jednolitej metodyki pobierania próbek, w konsekwencji których analizy korygujące wykonywano 2-3 krotnie, co odpowiednio potęgowało nakłady finansowe.

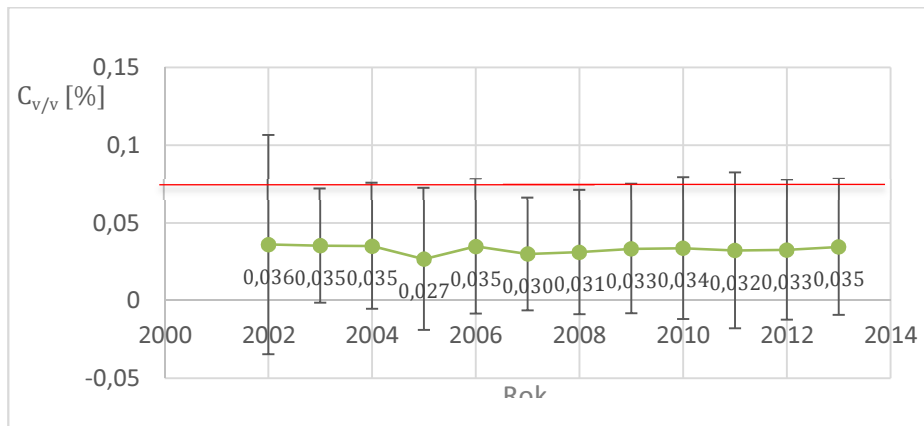
Należy nadmienić, że koszt wykonania oznaczenia, o którym mowa w chwili obecnej kształtuje się na poziomie około 900-1000zł (koszty materiałowe, personelu, wyposażenia itp.²⁴). Porównując udział procentowy odrzuconych pomiarów należy je rozpatrywać w kontekście nadplanowych nakładów finansowych związanych z wykonaniem ponownej analizy kontrolnej. Jak widać z rys.5. w najbardziej niesprzyjającym okresie eksploatacyjnym w latach 2002-2006 ponowne badanie było wymagane w co najmniej 43,14% przypadków. Przykładowo w roku 2006 ponowną analizę należało wykonać dla około 112 odrzuconych próbek, co łącznie mogło powodować dodatkowe wydatkowanie około 110. tys. zł.

Należy zwrócić uwagę, że w odróżnieniu od znacznego polepszenia, jakości co do zawartości H₂O w badanych próbkach zawartość CO₂ nie kształtowała się analogicznie. Zawartość CO₂ w całej badanej populacji wyników pomiarowych po początkowym spadku (2004-2005) powróciła w latach 2011-2012 do pierwotnego poziomu tj. około 20% ilości odrzuconych wyników pomiarowych. Poniżej na rys.18 przedstawiono szczegółowy rozkład wartości średnich pomiarów w poszczególnych latach z przedziałem ufności $\mp 0,95$.

Na rys.19 przedstawiono rozkład wartości średnich wraz z niepewnością rozszerzoną dla rozkładu T-studenta przy $k=1,96$.



Rys. 18. Wykres średnich $\bar{x}_{2002-2013}$ $\mp 0,95$ przedz. ufności dla pomiarów CO_2 Źródło: opracowanie własne.



Rys. 19. Wykres średnich $\bar{x}_{2002-2013}$ wraz z niepewnością rozszerzoną dla rozkładu T-studenta przy $k=1,96$ dla pomiarów CO_2 Źródło: opracowanie własne.

Jak widać występujące zmiany pomiarów wybranych zanieczyszczeń H_2O i CO_2 nie zawsze są jednoznaczne i nie wskazują w sposób czytelny czy są spowodowane zastosowaniem wymuszeń. Przebieg pomiarów CO_2 nie jest już tak jednoznaczny jak wyniki analizy danych pomiarowych H_2O . Wyniki wnioskowania statystycznego mającego na celu ocenę występujących różnic pomiędzy rozpatrywanymi grupami pomiarów zostaną przedstawione w osobnym artykule.

WNIOSKI

Jak pamiętamy na potrzeby dalszych prac przyjęto założenie, że osiągnięcie poprawy w zakresie odpowiedzi systemu i spełnienia wymagań jakościowych dla całej populacji można uznać za satysfakcjonujące, jeżeli udział procentowy wyników niespełniających wymagań dla poszczególnych zanieczyszczeń zostanie zmniejszony do wartości poniżej 20%.

Biorąc pod uwagę wyniki pomiarów z lat 2011-12 (rys.15) dla całej rozpatrywanej populacji należy stwierdzić, że osiągnięto zamierzony cel w odniesieniu do wszystkich zanieczyszczeń z nieznacznym przekroczeniem określonego progu przez pomiary zanieczyszczeń CO_2 (20,72%). Rozkład udziału wyników CO_2 wymaga dalszej analizy. Uzyskanie założonego celu było konsekwencją wybranego podejścia w zakresie wykonania prac modernizacyjnych. Prace ukierunkowano na zastosowanie rozwiązań technicznych, które wcześniej poddano badaniom modelowym oraz ocenie skuteczności ich oddziaływania.

Zastosowanie w skali makro omówionych rozwiązań technicznych wykorzystanych w badaniach grupy kontrolnej 2 i 3 przy zachowaniu unifikacji sprzętowej - typoszereg układów filtrujących (BAUER) pozwoliło na osiągnięcie dużych oszczędności finansowych. W efekcie służyło to racjonalizacji wydatków inwestycyjnych związanych z modernizacją techniczną SZRP w zakresie pozyskiwania nowej generacji źródeł zasilania. Na podstawie badań wybrano grupę kontrolną 3 źródeł zasilania, które zapewniają dużo bardziej stabilne warunki procesu produkcji i uzdatniania powietrza oddechowego (MARINER 250 D/E i 320D/E, VERTICUS 180-15-05 oraz SAUER @SOHN WP 5000, WP 4341).

Przedstawione wnioski dotyczące grupy zmiennych wywierających największy wpływ na odpowiedź systemu określiły kierunek modernizacji technicznej polegający na zastosowaniu rozwiązań grupy 3 w przypadku konieczności wymiany wyeksploatowanych urządzeń i sukcesywnego wdrażania rozwiązań grupy 2 w systemach podatnych na modernizację (dla sprężarek EK2-150, EK 7,5-3, A3HW1). Dzięki zastosowaniu układów grupy 2 uzyskano dwukrotne zmniejszenie wyników nieprawidłowych w porównaniu do grupy 1 odpowiadających stanowi pierwotnemu. Wyniki badań stanowiły podstawę do realizacji dalszych prac modernizacyjnych. Poniżej na rys.20-23 przedstawiono wybrane przykłady

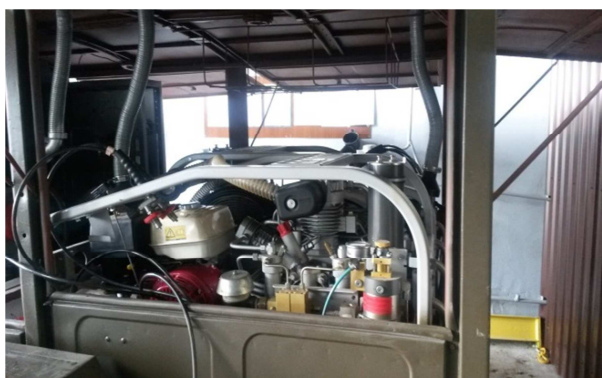
wdrożenia przez SRM DMW do użytkowania w SZRP kontenerowego zestawu PZZP²⁵ oraz modernizacji baz ORTOLAN w MWRP.



Rys. 20. Widok ogólny wnętrza kontenera Przenośnego Zestawu Zasilania Powietrzem. Źródło: opracowanie własne.



Rys. 21. Widok kontenera Przenośnego Zestawu Zasilania Powietrzem. Źródło: opracowanie własne.



Rys. 22. Widok wnętrza zespołu zasilania bazy zabezpieczenia prac podwodnych ORTOLAN wyposażonego w sprężarkę MARINER 320 D. Źródło: opracowanie własne.



Rys. 23. Widok ogólny zespołu zasilania bazy zabezpieczenia prac podwodnych ORTOLAN. Źródło: opracowanie własne.

Modernizację zespołów zasilania baz zabezpieczenia prac podwodnych ORTOLAN wykonano w ramach rozwiązań technicznych grupy 2 i 3.

Wykorzystanie metod optymalizacji [14] pozwoliło na uzyskanie wymiernych efektów podjętych działań. Utrzymanie jakości poprzez stałe monitorowanie procesu produkcji jak i jego kontroli poprzez zapewnienie odpowiedniej jakości wykonywania pomiarów laboratoryjnych zapewniło właściwe warunki dla kontroli procesu technicznego.

W ramach rozpatrywanego procesu na etapie badań stosowano szeroką grupę narzędzi służących zarządzaniu jakością i oceny ryzyka [12,8,15] do najważniejszych z nich należy zaliczyć zastosowanie:

- diagramu przyczynowo skutkowego ISHIKAWY;
- analizę PARETO²⁶
- analiza FMEA (Failure Mode and Effects Analysis);
- metody QFD (Quality Function Deployment);
- histogramy;
- arkuszy kontrolnych (SPC);
- metody eksploracji danych Data Mining.

Należy nadmienić, że ich wykorzystanie pozwoliło na efektywne zarządzanie procesem [16,13,15] oraz jego kontrolę. Wymienione metody okazały się bardzo przydatne.

Po zakończeniu badań i przystąpieniu do kontynuacji prac w ramach określonego kierunku polegającego na sukcesywnej modernizacji i wymiany urządzeń istotnym elementem było prowadzone wnioskowanie statystyczne pozwalające na dokonanie oceny zachodzących w procesie zmian. Proces oceny i analizy danych był prowadzonych w oparciu o wykonywanie sprawozdań kwartalnych i gromadzenie wyników pomiarów z badanej populacji w bazie danych pomiarowych WRTMiPP SRM DMW.

Przedstawiona ocena skuteczności doboru urządzeń technicznych oraz wykonane w jej konsekwencji prace pozwoliły na osiągnięcie w roku 2012 przyjętych kryteriów powodzenia prac określonych, jako zawartość $C_i \leq 20\%$. Jedynie w przypadku pomiarów CO₂ ilość odrzutów wyniosła 20,72%.

BIBLIOGRAFIA

1. Allen T.T. 2006 Introduction engineering statistics and six sigma London: Springer Ltd., 2006,
2. Antosz K. Zastosowanie metod R@R do analizy wybranych systemów pomiarowych Technologia i Automatykacja Montażu 3/2012; ISSN 1230-7661, strony 57-61,
3. ADivP-04 Diving Gas Quality ed.A ver.1 2013,
4. Gerber T: Statystyczne sterowanie procesami-doskonalenie jakości z pakietem Statistica-Stat Soft Kraków 2000 ISBN 83-912346-2-2,
5. Instrukcja o wojskowym ratownictwie morskim Marynarki Wojennej Mar. Woj. 1361/2012 DMW Gdynia 2012,
6. Jakus B, Kłos R. Zdolność procesu pomiarowego Polish Hyperbaric Research Gdynia (19)2007, ISSN 1734-7009, strony 33-46,
7. Kłos R. Ocena wiarygodności sytemu pomiarowego Polish Hyperbaric Research Gdynia 2(51)2015; ISSN 1734-7009, strony 31-46,
8. Kłos R. Pozyskiwanie danych i projektowanie eksperymentów w technice nurkowej Polish Hyperbaric Research Gdynia 4(13)2005; ISSN 1734-7009, strony 25-55,
9. NO-07-A005:2010 Nurkowanie w celach militarnych. Czynniki oddechowe. Klasyfikacja, wymagania i badania,
10. Pyzdek T. Six Sigma Handbook. New York: the McGraw Hill Companies, Inc., 2003. ISBN 0-07-141596-3; DOI: 10.1036/0071415963,
11. Rozporządzenie Ministra Obrony Narodowej z dnia 13 lipca 2005 r. w sprawie wykonywania prac podwodnych w jednostkach organizacyjnych podległych lub nadzorowanych przez Ministra Obrony Narodowej (Dz. U. Nr 185, poz. 1547),
12. Rozporządzenie Ministra Obrony Narodowej z dnia 21 czerwca 2012 r. w sprawie bezpieczeństwa wykonywania prac podwodnych w jednostkach organizacyjnych podległych lub nadzorowanych przez Ministra Obrony Narodowej (Dz. U. Nr 134, poz. 810),
13. Sałaciński T. Analiza zdolności narzędzi i systemów pomiarowych Inżynieria Maszyn, R. 17 z.2, 2012,
14. Woźniak A: Uzdatnianie powietrza oddechowego do celów hiperbarycznych Polish Hyperbaric Research Gdynia 3(48)2014, ISSN 1734-7009, strony 49-58,
15. Woźniak A: Uzdatnianie powietrza oddechowego do celów hiperbarycznych cz.II Polish Hyperbaric Research Gdynia 1(50)2015 ISSN 1734-7009, strony 31-46,
16. Walanus A. SPC i Six Sigma –pożądana zmienność w podejściu do metod statystycznych Stat Soft 2004.

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

¹ SZRP-Siły Zbrojne Rzeczypospolitej Polskiej,

² Adsorpcja- pochłanianie gazu przez ciecz lub - rzadziej – pochłanianie gazu lub cieczy przez ciało stałe, zachodzące w całej masie absorbentu,

³ Adsorpcja- pochłanianie gazu przez ciecz lub - rzadziej – pochłanianie gazu lub cieczy przez ciało stałe, zachodzące na powierzchni absorbentu,

⁴ MWRP-Marynarka Wojenna Rzeczypospolitej Polskiej,

⁵ AC-węgiel aktywny,

⁶ MS-sita molekularne,

⁷ HP-Hopkalit-(mieszanka MnO₂, CuO, Co₂O₃, Ag₂O),

⁸ FID(ang. Flame Ionization Detector)- detektor płomieniowo-jonizacyjny,

⁹ PDD(ang. Pulsed Discharge Detector)- detektor z wyładowaniem termopulsowym,

¹⁰ FTIR(ang. Fourier Transform Infrared Spectroscopy) –spektroskopia IR z transformacją Fouriera,

¹¹ C_i-parametr wyjściowy (pomiar zawartości i-tego zanieczyszczenia powietrza oddechowego: C_{H₂O}, C_{CO}, C_{CO₂}, C_{CH₄}, C_{NO_x} w badanej próbce,

za układem filtrującym),

¹² WRTMiPP SRMDMW- Wydział Ratowania Techniki Morskiej i Prac Podwodnych Szefostwa Ratownictwa Morskiego Dowództwa Marynarki Wojennej,

¹³ SPC(ang. Statistical Process Control)-statystyczne sterowanie procesem,

¹⁴ MR(ang. Moving Range)–ruchomy rozstęp–wartość bezwzględna różnicy pomiędzy dwoma kolejnymi pomiarami w sąsiednich próbkach,

¹⁵ Oznaczonych literą „M”,

¹⁶ CL(ang. Center Line)-linia centralna – wyznacza obliczoną wartość średnią \bar{X} dla rozpatrywanej grupy pomiarów,

¹⁷ CC(ang. Control Chart)-karta kontrolna,

¹⁸ LCL(ang. Lower Control Limit)-dolna granica(linia) kontrolna - obliczona lub ustalona wartość dla rozpatrywanej grupy pomiarów-w omawianym przypadku 0mg/m³ H₂O,

¹⁹ UCL(ang. Upper Control Limit)-górną granica (linia)kontrolna - obliczona lub ustalona wartość dla rozpatrywanej grupy pomiarów - w omawianym przypadku 50mg/m³ H₂O dla kl.II, 35mg/m³ H₂O dla kl.I wg. NO-07-A005:2010,

²⁰ Wapno sodowane (mieszanka NaOH, Ca(OH)₂, H₂O),

²¹ Chemiczna analiza jakościowa - zespół technik umożliwiających poznanie składu chemicznego badanych mieszanin związków chemicznych,

²² Chemiczna analiza ilościowa - zespół technik umożliwiających poznanie liczbowej wartości (w odpowiednich jednostkach miary, np. w gramach, lub innych i ich wielokrotnościach) składu chemicznego badanych mieszanin,

²³ NO-07-A005:2010 Nurkowanie w celach militarnych Czynniki oddechowe dla nurków Klasyfikacja, wymagania i badania,

²⁴ Wg. ofert dostępnych na rynku dla oznaczenia jakościowo-ilościowego zanieczyszczeń w powietrzu oddechowym zgodnie z NO-07-A005,

²⁵ PZZP- Przenośny Zestaw Zasilania Powietrzem,

²⁶ Analiza PARETO - zwana również metodą ABC.

