POLISH HYPERBARIC RESEARCH 1(62)2018
Journal of Polish Hyperbaric Medicine and Technology Society
Faculty of Mechanical and Electrical Engineering of the Polish Naval Academy

# ANALYSIS OF THE BREATHING AIR PRODUCTION PROCESS FOR HYPERBARIC PURPOSES

# ANALIZA PROCESU OTRZYMANIA POWIETRZA ODDECHOWEGO DO CELÓW HIPERBARYCZNYCH

# АНАЛИЗ ПРОЦЕССА ПОЛУЧЕНИЯ ДЫХАТЕЛЬНОЙ СМЕСИ ДЛЯ ГИПЕРБАРИЧЕСКИХ ЦЕЛЕЙ

# ANALYSE DES PROZESSES DER GEWINNUNG VON ATEMLUFT FÜR HYPERBARE ZWECKE

# ANÁLISIS DEL PROCESO DE RECEPCIÓN DE AIRE RESPIRABLE PARA PROPÓSITOS HIPERBÁRICOS

Arkadiusz Woźniak

Department of Underwater Works Technology, Polish Naval Academy Gdynia, Poland
Zakład Technologii Prac Podwodnych, Akademia Marynarki Wojennej w Gdyni

## STRESZCZENIA / ABSTRACTS

The quality of breathing air plays a key role in the safety of divers and hyperbaric facilities. Paradoxically, the change of regulations concerning quality requirements for breathing mixes has imposed the need for verification of the technical and laboratory bases used in their production and control. This article presents the results of research related to the rationalisation of the process of production and supply of breathing air for the purposes of hyperbaric oxygenation. The work was carried out using the SixSigma method.
**Keywords:** underwater works technology, diving gases, capability, process, control charts.

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.

Качество дыхательной смеси имеет ключевое значение для безопасности ныряльщиков и гипербарических объектов. Парадоксально, что изменение правовых норм, касающихся качественных требований к дыхательным факторам, привело к необходимости проверки технической и лабораторной базы, которая использовалась для их производства. В статье приведены результаты исследований, связанных с рационализацией процесса получения и дистрибьюции дыхательной смеси, предназначенной для условий кислородной оксигенации. Работы проводились с использованием методаSixSigma.
**Ключевые слова:** технология подводных работ, дыхательные факторы ныряния, способность процесс, контрольные карты.

Die Qualität der Atemluft hat eine Schlüsselbedeutung für die Sicherheit von Tauchern und hyperbaren Objekten. Paradoxerweise hat eine Änderung hat die Änderung von Vorschriften bezüglich der qualitativen Anforderungen für Atemfaktoren die Notwendigkeit erzwungen, die Technik- und Laborbasis zu verifizieren, die zu ihrer Produktion und Kontrolle verwendet wird. Im Artikel wurden die Untersuchungsergebnisse in Verbindung mit der Rationalisierung der Gewinnung und der Verteilung von Atemluft dargestellt, die für hyperbare Sauerstoffbedingungen bestimmt sind. Die Arbeit wurde unter Verwendung der Methode SixSigma durchgeführt.
**Schlüsselwörter**: Technologie von Unterwasserarbeiten, Taucher-Atemfaktoren, Prozessfähigkeit, Kontrollblätter.

La calidad del aire respirado juega un papel clave en la seguridad de los buzos e instrumentos hiperbáricos. Paradójicamente, los cambios introducidos en la normativa sobre los requisitos de calidad de los gases respirables, obligó a comprobar la base técnica y de laboratorio utilizada para su producción y control. En el artículo se presentan los resultados de los estudios sobre la racionalización del proceso de recepción y distribución del aire respiratorio destinado a condiciones de oxígeno hiperbárico. El trabajo ha sido llevado a cabo mediante el método SixSigma
**Palabras clave:** tecnología de trabajos subacuáticos, gases respiratorios para submarinismo, capacidad del proceso, tarjetas de control.

ARTICLE INFO

PolHypRes 2018 Vol. 62 Issue 1 pp. 7 - 32
**ISSN:** 1734-7009 **eISSN:** 2084-0535
**DOI:** 10.2478/phr-2018-0001
Pages: 26, figures: 23, tables: 7
**page www of the periodical:** www.phr.net.pl

**Publisher**
Polish Hyperbaric Medicine and Technology Society

**Typ artykułu: oryginalny**
**Original article**

**Termin nadesłania: 13.08.2017**
**Termin zatwierdzenia do druku: 29.09.2017**

## 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 przeznaczonego 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 kontekstu[4] 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 2002 r., 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.

## INTRODUCTION

The changes related to Poland's accession to the North Atlantic Treaty Organisation (NATO) necessitated the need for modernisation of the *Polish Armed Forces* to ensure the interoperability. The implementation of *STANAG* standardisation documents[1] in the *Polish Armed Forces* required undertaking many organisational measures aimed at solving the emerging problems. One of them was the insufficient quality of the breathing air used for hyperbaric purposes. Poland's unconditional acceptance of the provisions of *STANAG* 1458[2] and *AdivP*-01[3] without the proper preparation of the *Polish Armed Forces* significantly limited the capacity to carry out underwater activities, thus reducing the use of domestic equipment in the production of breathing air.

### PROBLEM

As shown by the context analysis[4] of the problem connected with ensuring the necessary quality in the process of supplying the *Polish Armed Forces* with breathing air that was carried out at the turn of the century, there was a need to undertake staged systemic actions. In this context, in a sudden encounter with *NATO* requirements related to breathing air supply systems, a potential threat occurred of a significant reduction of the operational capacity of the *Polish Armed Forces* due to the inability to use the existing equipment.

Targeted actions were to ensure the removal of a high failure level of breathing air supply sources in a given time perspective. As recently as in 2002, after the initiation of changes in the breathing air supply system, the scale of prohibition of operation reached nearly 80–90% [1] of the air supply sources used by the *Polish Armed Forces*. The necessary changes required significant expenditures on the modernisation of breathing air production systems and distribution operated in the *Polish Armed Forces*, as well as gradual replacement of the old systems with new ones. The article presents the counterbalancing of the two processes: modernisation and successive replacement of old systems with new ones.

With regard to the normative content [2] of breathing air pollutants, an analysis was carried out with regard to their toxic effect. It was based on previously published research results, which despite the significant passage of time are still valid [3], as they were supplemented with newer results in later publications [4].

Based on the diagnosis of the situation, it appeared that in order to ensure the provision of the *Polish Armed Forces* with appropriate systems for the production, storage and distribution of breathing air, it is not sufficient to replace the compressor, filtration and distribution systems with newer ones. There was also a need to modernise the laboratory base and build an air purification facility adjusted to the technical conditions of the systems used for the production, storage and distribution of breathing air.

## CEL PRACY

Celem prac była racjonalizacja procesu otrzymywania, utrzymywania i dystrybucji powietrza oddechowego przeznaczonego na tlenowe warunki hiperbaryczne przy wypełnieniu założonych krytycznych wymagań jakościowych $CTQ$55. Przyjęto, że możliwe jest wykorzystanie podejścia $SixSigma$ do osiągniecia celu projektu poprzez realizację zadania polegającego na ustaleniu i zrealizowaniu koniecznego zakresu modernizacji dotychczas użytkowanych systemów do otrzymywania, utrzymywania i dystrybucji powietrza oddechowego przeznaczonego 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] opartego 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

## OBJECTIVE OF THE WORK

The objective of the work consisted in the rationalisation of the process of production, storage and distribution of breathing air for hyperbaric purposes with consideration of the need to fulfil the assumed critical quality requirements $CTQ$5[5]. It was assumed that the project's goal was possible to accomplish by use of the $SixSigma$ approach, consisting in the determination and implementation of the necessary scope of modernisation of systems used thus far to obtain, store and distribute breathing air for hyperbaric purposes.

## METHOD

The work was carried out using the recognised scientific methods of the $SixSigma$ approach, which is one of many pro-quality systems used. This method is oriented towards implementation of a long-term quality improvement strategy involving the elimination of process variability at all stages of its realisation through successive implementation of improvement projects. The $SixSigma$ approach combines well-known quality control techniques ($SPC$[6]) with other statistical methods. The basis of this method is the improvement and continuous development of new solutions as part of a streamlined process. The improvement of capability of an extremely inefficient process was based on the application of a recognised method of product improvement. The aim was to successively reduce system variability.

The advantage of this method is its focus on maximising the reduction of defects in the process, leading to the improvement of quality at a reasonable and acceptable cost. The consistent application of the established $DMAIC$ [7] algorithm based on the implementation of a set of activities or tasks in a methodical manner leads to the development of the desired solution. Most quality improvement systems are based on simple organisational and motivational actions, as is for instance $Lean\ Management$.

The comprehensive $SixSigma$ approach does not eliminate these methods, it simply extends them. As soon as all the obvious, deterministic causes disturbing the process under consideration are eliminated with the use of simple methods, other mathematical methods can be used to diagnose the extent to which the process deviates from its natural variability. The low popularity of the $SixSigma$ approach results, among other things, from the necessity of incurring significant expenditures on software and the employment of a team of trained specialists who can use scientific methods to implement industrial processes and laboratory activities.

The use of this approach requires special tools and statistical techniques, which results in a relatively high cost of their implementation. The greatest problem also lies in the necessity to change the approach of those involved in the production process resulting from changes in the organisational culture of the process. This involves a constant requirement for employee training within the observance of $SOP$ [8].

Despite these difficulties, an informed decision was taken to implement the project on the basis of the $SixSigma$ strategy.

Due to limited resources and possibilities, only selected methods of the $SixSigma$ approach were used. The work objectives were defined with the use of

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 eksperymentów[14] oraz zasady rachunku niepewności wyników pomiarów przy wykorzystaniu metod analizy statystycznej serii obserwacji – metoda $typu\ A$ [5].

## BADANIA

W fazie definiowania[15] określono proces, który będzie racjonalizowany. Wskazano jego miejsce w systemie oraz odniesienie systemu do najbliższego otoczenia[16]. 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] zdiagnozowane[19] $CTQ$ 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 wzajemnie[21]. 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 preprowadzone w badaniach wcześniejszych [7].

a context analysis based on the $SWOT$[9] method. Rationalised processes were defined with the use of the $QFD$[10] diagram, whilst the risk analysis was based in accordance with the $FMEA$[11] approach. The base of responses from a tested system was analysed in terms of explorable determinism using *Data Mining* methods. The exploration of the collected base of observational data sets of control samples was conducted towards the identification of an occurrence of unexpected relationships and special disruptions. The stability of rationalised processes was tested using $SPC$ [12] [13] statistical control methods.

The conclusions were drawn using statistical inference methods based on practical distribution of a random variable. During the experiments, typical methods of deterministic design of experiments[14] were used, as well as the rules of uncertainty of measurement results using statistical analysis methods of a series of observations – the $type\ A$ method [5].

## RESEARCH

The process subject to rationalisation was defined in the definition phase[15]. Its place in the system was indicated as was its closest environment[16]. The main stakeholders of an improved process were defined and their $CTQ$ requirements were specified as being critical from the point of view of product quality [6]. The client's requirements were translated into critical quality requirements $CTQ$[17]. A high-level process map was defined encompassing the context and the system connected with the process under improvement, and other processes operating in the said system. Products have been hierarchised in relation to their links to quality requirements $CTQ$. Next, in the measurement phase, using the $QFD$[18] method the $CTQ$ were diagnosed[19] for the rationalised process. A preliminary risk analysis was performed for the process of supply of air for hyperbaric purposes with the $FMEA$[20] methods. This allowed to establish the methods to improve process stability with regard to compliance with $CTQ$. The analysis showed that many product characteristics are interdependent[21]. The processes of quality control, filtration and training were recognised as the three most important processes of breathing air production for hyperbaric purposes.

It was assumed that the main indicator of achievement of the objective would be a reduction in critical impurities found in 90% of analysed samples. Next, the process map was analysed once again and supplemented with a physico-chemical analysis system. The said supplementation is important as the results of the physico-chemical air tests constituted system response confirming the fulfilment or non-fulfilment of requirements regarding process limitations – fig. 1. The analyses of the measurement system were omitted, as they were carried out in earlier studies [7].

In the analysis phase, the current level of contamination in the obtained breathing air was determined on the basis of systemic and deliberately collected, stored and processed data. A technical experiment was carried out allowing selection of filtration kits which were either available on the market or possible to design, implement and produce ourselves. The fulfilment of critical quality requirements $CTQ$ was verified on the basis of the responses from the breathing air production systems. The level of compliance with the

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. Sprawdzono 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.

quality requirements $CTQ$ with the achievements of leading countries of $NATO$ was compared. The level of process variability was diagnosed as well as the directions for its improvement.

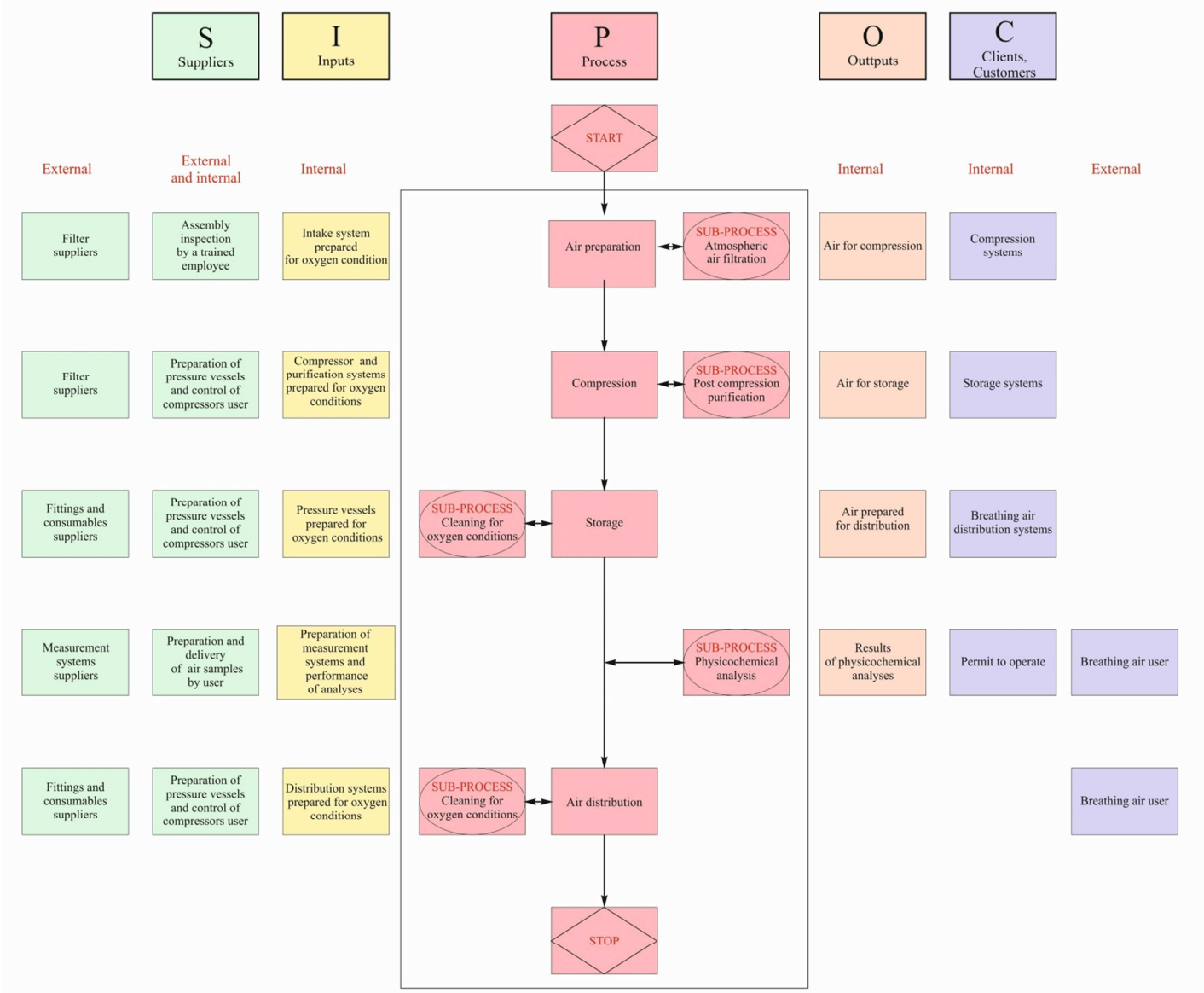


Fig. 1 Improved general map of the process of production, storage and distribution of air approved for use in hyperbaric oxygen conditions presented in the form of a $SIPOC$ diagram.

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 problemem 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 $CO, CO_2, H_2O, CH_4$ w produkcie.

## SELECTION OF A FILTRATION AND COMPRESSION SYSTEM

Proper selection of air treatment systems was a significant problem when conducting effective modernisation of breathing air supply systems for hyperbaric purposes. During the research it was necessary to determine the possibility of meeting the critical quality requirements $CTQ$. In the selection of the compression system for testing it is reasonable to use the worst-case scenario method, taking into account the purposefulness of maintaining these installations in further operation. In the capitalisation of knowledge, the existing types of construction solutions were analysed. Despite the reduction in the number of offshore military units and vessels of the $Polish\ Navy$, between 100 and 150 different air supply systems were used in hyperbaric conditions. This includes approximately 26–30 high-performance compressors, 30–40 marine compressors on vessels and 45–50 portable systems powered by electricity or a diesel motor [8].

According to the results of quarterly measurements of various types of air supply sources it was found that the system installed on the ship proj. 570 equipped with a compressor $EK\ 7.5-3M$ and $P140\ BAUER$ filtration system met the quality requirements $CTQ$ in contrast to the remaining breathing air supply systems intended for hyperbaric purposes.

Market study showed that domestic producers are not able to quickly offer a ready-made range of filter cartridges that meet the minimum quality requirements $CTQ$. Based on the conducted analysis tab. 1 presents the ranking of the considered filtration systems [9]. Theoretically, a filtration system series should ensure fulfilment of critical quality requirements $CTQ$ in the process. Tests of the $P61$ filtration system series manufactured by $BAUER$ were carried out in relation to the most popular compressors in the Polish Armed Forces $EK2-150$ and $A3HW1\ GERA-32/70$[22].

Bench tests performed on a model system based on a selected physical model allowed the obtainment of measured results for breathing air samples, which are presented in tab. 2. The collected measurement results initially confirmed the possibility of satisfying the critical quality requirements $CTQ$ for the production of breathing air for hyperbaric purposes by the proposed sets of filters [10]. The use of a set of filters in combination with a water-oil separator and automatic condensate discharge caused a multiple reduction in the content of $CO, CO_2, H_2O, CH_4$ in the product.

Tab. 1

Ranking of filtration system following the evaluation of technical and quality parameters in terms of meeting quality requirements $CTQ$ for the process of supply of breathing air for hyperbaric purposes.

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

| Filter type | Comparative ranking – *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

The comparison of analyses of control samples from breathing air supply sources before and after modernisation.

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

| Mix under measurement | Measuremet unit | Compressors | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| | | Before modernisation | | After modernisation | |
| | | No. 2727 | No.12833 | No. 2727 | No.12833 |
| Oxygen | % | 20.77 | 20.92 | 20.93 | 21 |
| Carbon dioxide $CO_2$ | % | 0.0468 | 0.0317 | 0.0 | 0.0101 |
| Carbon monoxide, $CO$ | $ppm$ | 0.69 | 0.62 | 0.41 | 0.32 |
| Nitrogen oxides $NO_x$ | $ppm$ | 0.111 | 0.255 | 0.196 | 0.082 |
| $C_nH_m$vapours calculated into $CH_4$ | $mg \cdot m^{-3}$ | 3.93 | 1 | 0.5 | 0.4 |
| Steam $H_2O$ | $mg \cdot m^{-3}$ | 111 | 56.98 | 10.95 | 9.55 |

Ocena możliwości upowszechnienia proponowanych filtrów wraz ze wskaźnikiem diagnostycznym[23] 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.

The assessment of the possibility of dissemination of the proposed filters together with the diagnostic indicator[23] may enable the fulfilment of critical quality requirements $CTQ$. The elimination of the impact of the occurring hazards of failure to meet critical quality requirements $CTQ$ will be achieved through modification of certain subprocesses in a way that ensures obtaining products that meet the requirements for a rationalised process. The tests were carried out on three specified control groups, whose division is presented in tab. 3-4.

Tab. 3

General division into control groups with regard to the applied air treatment solution.

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

| The type of applied compression and filtration system | Control group |
|---|---|
| classic filter cartridge + classic supply source | 1 |
| new filter cartridge + classic supply source | 2 |
| new filter cartridge + new supply source | 3 |

Obserwacje prowadzono pod kątem oceny zmiany funkcji celu przy zmianach konfiguracji z wykorzystaniem metod statystycznego sterowania procesem $SPC$[24]. Umożliwiło to określenie skali odpowiedzi na wprowadzone wymuszenia. Za proces wydajny uważano proces, który uznano za stabilny, wydolny i wycentrowany [11].

Observations were conducted in order to evaluate changes in the target function during configuration changes using the statistical methods of process control $SPC$[24]. This made it possible to determine the scale of responses to the changes introduced. An efficient process was such that was considered to be stable, effective and aligned [11].

Tab. 4

General division into control groups with regard to the applied air treatment solution in accordance with tab. 3.

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

| Compressor type | Serial no. | Control group |
|---|---|---|
| *BAUER VERTICUS* 150 – 15 – 05 | 5108-1183 | 3 |
| *BAUER MARINER* 320*D* | 5208-3667 | 3 |
| *BAUER MARINER* 320*E* | 5208-3666 | 3 |
| *BAUER MARINER* 320*E* | 5104-1720 | 3 |
| *BAUER MARINER* 250*E* | 5101-0345 | 3 |
| *Sauer & Sohn WP* 5000 | 442 | 3 |
| *EK* – 7.5 – 3*M* | 342 | 2 |
| *EK*2 – 150 | 183 | 1 |
| *EK*2 – 150*M* | 2727 | 2 |
| *EK*2 – 150*M* | 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.

## RESEARCH RESULTS

The decision regarding the level of investment related to the successive modernisation or replacement of air supply sources was based on research results. At the initial stage of the research, the authors referred to the results obtained in the years 2002–2006.

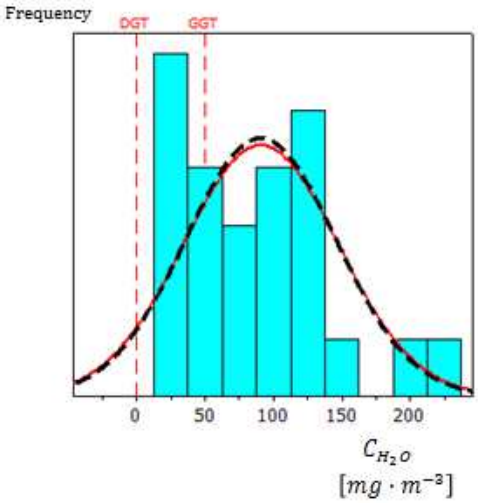


Fig. 2 The histogram of empirical distribution of measurement data with control limits ($\bar{x} = 90.6\, mg \cdot m^{-3}$, $n = 25$, $DGT^{25} = 0$, $GGT^{26} = 50\, mg \cdot m^{-3}$) for compressor $EK2 - 150$.

Rys. 2 Histogram rozkładu empirycznego danych pomiarowych z granicami kontrolnymi ($\bar{x} = 90.6\, mg \cdot m^{-3}$, $n = 25$, $DGT^{25} = 0$, $GGT^{26} = 50\, mg \cdot m^{-3}$) dla sprężarki $EK2 - 150$.

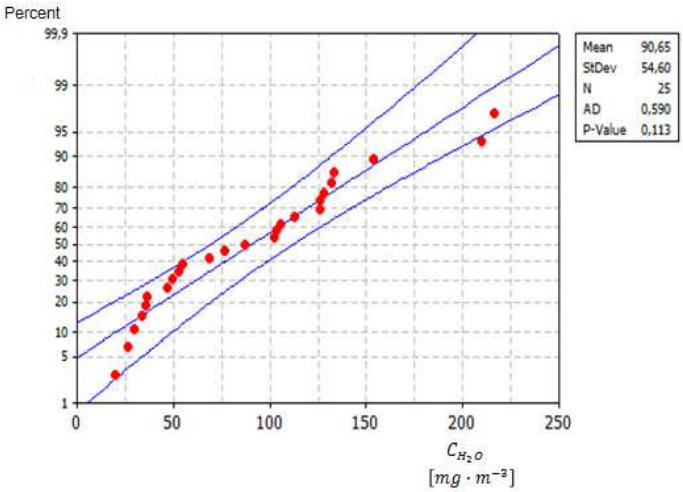


Fig. 3 The graphic test of normality of distribution of empirical data.

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

Fig. 2 presents the distribution of measurements of $H_2O$ content performed for the system equipped with an $EK2 - 150$ compressor prior to modernisation, in concord with tab. 4. The results of $C_{H_2O}$ measurements are above the upper tolerance limit $C_{H_2O}^{max}$, thus failing to meet one of the critical quality requirements $CTQ$. The presented example illustrates an extremely inefficient production process. The histogram presents the process course referenced to the defined limits of $CTQ$ specification. In cases when the possibility for improvement is limited or impossible, further actions should involve a technological leap usually associated with the use of a new type of machinery, technologies,

maszyn, technologii, zmiany *SOP* itp. Powyższe działania w konsekwencji mogą doprowadzić do zmniejszenia rozrzutu procesu. Testowanie normalności rozkładu[27] dla danych empirycznych można przeprowadzić np. z zastosowaniem testu AD[28] – rys. 3.

Teoretycznie dla rozkładu normalnego odchylenie standardowe populacji $\sigma$ 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 $C_{H_2O}^{max} = 5{,}0 \cdot 10^{-2} g \cdot m^{-3}$ [10]. Zgodnie z oczekiwaniami, przedstawione na rys. 5 wyniki pomiarów pokazują, że najbardziej efektywnym rozwiązaniem było zastosowanie systemu $MARINER\ 250E$. Modernizacja sprężarki $EK - 7{,}5 - 3\ M$ 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 kontrolną[29] $IX - MR$[30]. 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,

changes in *SOP, etc.* The above measures may in consequence lead to a reduction in process variability. Testing of the normality of distribution[27] of empirical data can be carried out using for instance the AD[28] – fig. 3.

Theoretically, for a normal distribution the standard deviation for the $\sigma$ population consisting of $n$ measurements gives a standard distribution $\sigma_{\bar{x}}$ of the mean value $\bar{x}$ amounting to $\sigma_{\bar{x}} = \frac{\sigma}{\sqrt{n}}$ [12]. It is assumed that for a stabilised process under statistical control, the distribution of mean values $\bar{x}_i$ for individual measurement series should not exceed the control limits located within the distance $\pm 3 \cdot \sigma_{\bar{x}}$ from the designated central line constituting the global mean $\bar{\bar{x}} = \frac{1}{m} \cdot \sum_i^m \bar{x}_i$ [11]. The thus established control limits of the variability range contain approximately 99.73% of all values for the normal distribution. The analysed process is not under statistical control, as the spread of results is greater and well beyond the set tolerance limits. This suggests that the process is influenced by a deterministic phenomenon causing an increase in process variability deviating from natural. This gives the field for process improvement by introducing changes in some of its parameters.

Fig. 4 presents a comparison of compressors with respect to the maximum content of $H_2O$ in the case of breathing air for hyperbaric conditions amounting to $C_{H_2O}^{max} = 5.0 \cdot 10^{-2} g \cdot m^{-3}$ [10] As expected, the measurement results presented in fig. 5 show that the most effective solution consists in the use of the $MARINER\ 250E$ system, however modernisation of the $EK - 7.5 - 3\ M$ compressors is also acceptable. The measurement results obtained for the $A3HW1M$ compressor depart significantly from those obtained both for the $MARINER\ 250E$ and $EK - 7.5 - 3M$.

As part of the control of the breathing air production process, each type of air supply source was considered separately. The control was performed using the statistical quality management method $SPC$ implemented with the use of control charts [12,11]. The control charts were used to monitor process quality through the control of location and variability of measurement results in relation to the defined tolerance limits. Fig. 6 presents the obtained $H_2O$ measurement results recorded on a control chart[29] $IX - MR$[30]. The control charts were used to monitor the quality of particular quarterly $H_2O$ content measurements collected in chart $IX$ – upper graph in fig. 5.

Upon the summation of each point, the global mean value $\bar{x}$ and the upper and lower limit is referenced to the three values of the mean standard deviation $\bar{s}$ from measurements $\pm 3 \cdot \bar{s}$, with the exception of outliers. Outliers are marked in red and are located outside the accepted limits. The movable range chart $MR$ is located below the individual observations chart $IX$ – bottom graph in fig. 6. Due to the method used there is no fixed value for the first measurement. Successive mean values of the movable range $\overline{MR}$ are used to calculate the approximate value of mean standard deviation $\bar{s}$ for each portion of collected measurements used to calculate the limits for individual measurements $IX$. The calculations were performed using standard statistical software – $MINITAB$.

The distribution of measurements shown in control charts $IX - MR$ in fig. 6 indicates that the air quality is compliant with the specification.

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 linią 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 statystyczną[32].

All measurements are below the upper tolerance limit $GGT_2$. Beyond the control line $UCL$[31] distortions occur both on chart $IX$ and the moving range chart $\overline{MR}$. When the control charts did not show irregularities understood as the exceedance of the tolerance limits or constant trends, it could be assumed that the process is under the statistical contro[32].

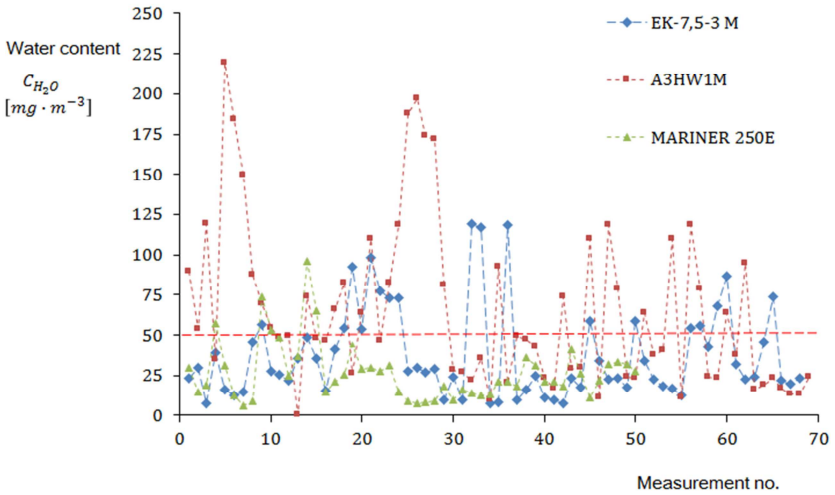


Fig. 4 Consecutive $C_{H_2O}$ concentration measurement results in the breathing air for various compressors in the years 2002–2013.

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

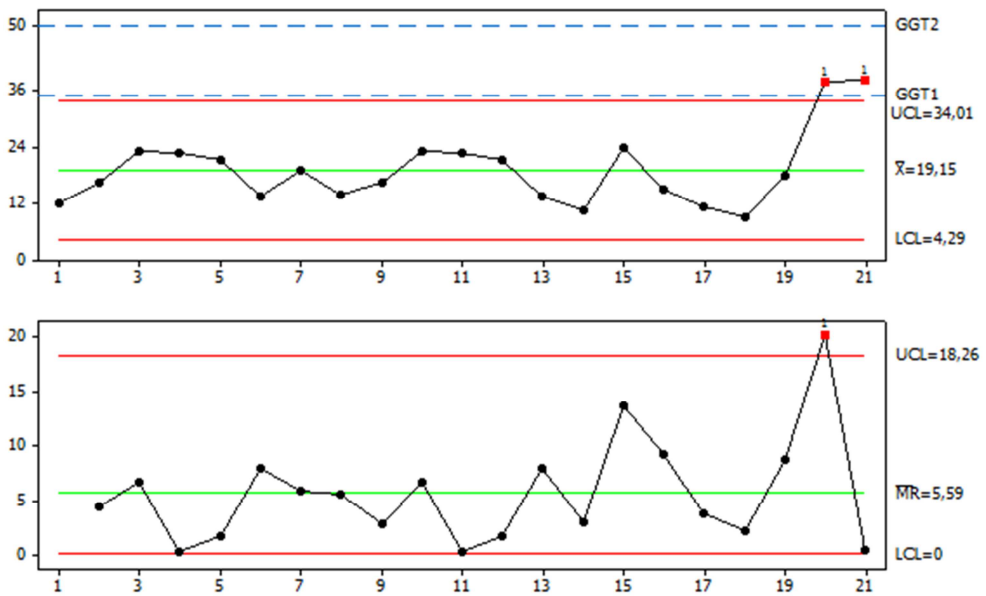


Fig. 5 The distribution of $H_2O$ measurement results in control chart $IX - MR$ obtained for $MARINER\ 320D$ compressor.

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 $\bar{\bar{x}}$ dla monitorowanego parametru w przyjętym czasie od granic specyfikacji $C_{pk} = \min\left\{\frac{USL-\bar{\bar{x}}}{3 \cdot s}; \frac{\bar{\bar{x}}-LSL}{3 \cdot s}\right\}$.

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 maszyn[37] i oceny ich zdolności krótko-[38] lub długoterminowej. W tym przypadku wskaźniki przyjmują odpowiednio oznaczenia $C_m, C_{mk}$ i $P_p, P_{pk}$.

Fig. 6 presents an empirical data distribution histogram for the $MARINER\ 320D$ compressor. The considered distribution falls within the specification limits. The distribution under consideration is within the specification limits, although there are measurements in the $GGO$[33] zone and outside the $UCL$ that indicate poor alignment.

To assess the process capability, point measures $C_p$ and $C_{pk}$ are used. The dispersion index $C_p$[34] expresses the potential capacity of the process to meet critical quality requirements $CTQ$, if a monitored process parameter oscillates within the specification limits $[USL; LSL]$. This index constitutes the reference range of the $USL - LSL$ specification limits to sixtuple standard deviation value $s$ of the process: $C_p = \frac{USL-LSL}{6 \cdot s}$. Its value should be greater than unity $C_p > 1$. Process alignment index $C_{pk}$ shows real potential process capability taking into account its current alignment and spread. The assumed $C_{pk}$ index is a smaller value from the distance of the global correct value commonly calculated as the global mean $\bar{\bar{x}}$ for the monitored parameter within the defined time from specification limits $C_{pk} = \min\left\{\frac{USL-\bar{\bar{x}}}{3 \cdot s}; \frac{\bar{\bar{x}}-LSL}{3 \cdot s}\right\}$.

In the case of process capability assessment regarding the fulfilment of quality requirements $CTQ$ the real process capability index $C_{pk}$[35] should be at least greater than unity $C_{pk} > 1$[36]. The analysis of the above indexes gives us the opportunity to identify an occurrence of deterministic disturbances that lead to process instability. If the value of both indicators is the same, it can be concluded that the process is stable from the point of view of its alignment. Depending on the needs the indices can be calculated at the stage of machine qualification[37] and its short-[38] or long-term assessment with regard to capability. In this case the indices are marked respectively as $C_m, C_{mk}$ and $P_p, P_{pk}$.

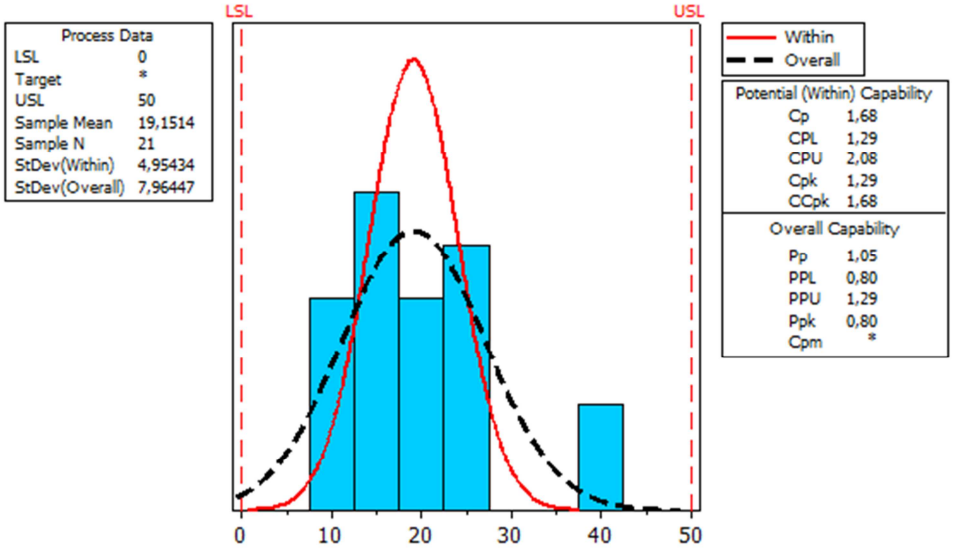


Fig. 6 The histogram of empirical distribution of measurement data with the control limits ($\bar{x} = 19.15mg \cdot m^{-3}$, $n = 21$, D$GT = 0$, G$GT = 50mg \cdot m^{-3}$) for the *MARINER* 320*D* compressor.

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

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.

The share of results exceeding the upper limit of $CO_2$ and $H_2O$ contents in control groups of the tested systems in accordance with tab. 3–4. is collectively presented in tab. 5.

Tab. 5

The share of results exceeding the upper limit of $CO_2$ and $H_2O$ contents in control groups in accordance with tab. 3–4 in the years 2002–2013.

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

| Compressor type | Control group | Frequency of non-compliances with quality requirements $CTQ$ in cl. II breathing air [%] | |
|---|---|---|---|
| | | $CO_2$ | $H_2O$ |
| $EK2-150$ | 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* 250*E* | 3 | 10 | 4,00 |
| *BAUER MARINER* 320*E* | 3 | 4.54 | 4.54 |
| *BAUER VERTICUS* 180 – 15 – 5 | 3 | 25 | 3.57 |
| *BAUER MARINER* 320*D* | 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 $C_{CO_2}^{max} = 0{,}05\%_v$. 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 $C_{CO_2}^{max} = 0{,}05\%_v$ oscylowały w zakresie 8,69%–16,17%. Systemy niezmodernizowane grupy 1 wg tab. 5. wykazywały około 20% przekroczeń granicy $C_{CO_2}^{max} = 0{,}05\%_v$.

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

The greatest share of non-compliant $CO_2$ results obtained for the new system is odd. The same filtration systems is used in the $BAUER\ VERTICUS\ 180-15-5$ and in other compression systems of the third group, yet it indicated narrower non-compliance levels of $5-10\%$ with regard to the required limit of $C_{CO_2}^{max} = 0.05\%_v$. This shows that even the most modern filtration systems are not resistant to the operator's non-compliance with the $SOP$ in the area of equipment inspection and in the process of taking control samples.

In the case of the modernised systems of group 2, in accordance with tab. 3–4. Measured results exceeding the content $C_{CO_2}^{max} = 0.05\%_v$ oscillate within a range of between 8.69%–16.17%. The non-modernised systems of group 1, as shown by tab. 5. indicated approximately 20% of limit exceedances $C_{CO_2}^{max} = 0.05\%_v$.

With regard to $H_2O$ content reduction the most efficient solution is that applied for group 3, where the share of non-compliances falls between 3.57% and 4.54% – tab. 5. In the case of group 2, depending on the compression system and the use of the same filtration the share of non-compliances oscillates within the range between 23.52% and 44.92% % – tab. 5. Most non-compliances are observed in group 1, i.e. approximately 66.6% – tab. 5. The use of modern filtration systems does not meet the quality requirements of CTQ at a satisfactory level due to the use of exhausted compression systems. The same filtration systems used with new compression systems are by many times more effective and lead to a reduction in the number of inconsistencies for $H_2O$: up to 4% in the case of the $MARINER\ 250E$ and up to 3.57% for the $VERTICUS\ 180-15-05$.

The poor modernisation opportunities of the air supply systems are mainly due to the older systems being more prone to operator error. Such hazards have caused a significant reduction in the service life of filter cartridges, thus increasing operating costs and not ensuring sufficient system stability.

Tab. 5 collectively presents mean values $\bar{x}$ calculated for the tested systems and the error value $\Delta\bar{x}$ for the inference significance at the technical level of $\alpha = 0.05$. The results are presented in fig. 7.

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.

The differences between mean values $\bar{x}$ obtained by new and legacy systems are significant.

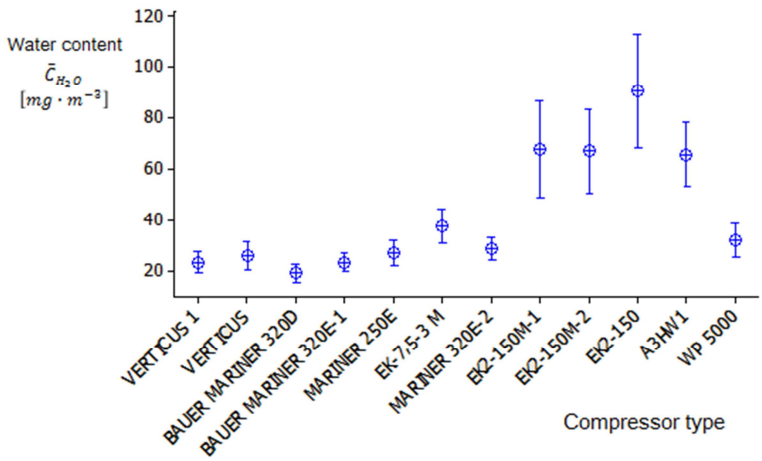


Fig. 7 Mean values $\bar{x} \pm \Delta x(P = 0.95)$ for $H_2O$ content measurements in various compression systems in the years 2002–2013.

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

A summary of process capability indicators in relation to ensuring $H_2O$ content within the specification limits of $C_{H_2O} \in [LSL = 0;\ USL = 5.0 \cdot 10^{-2} g \cdot m^{-3}]$.

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

| Hierarchy | Control group | Compressor type | $C_p$ | $C_{pK}$ |
|---|---|---|---|---|
| Operative systems | | | | |
| 1 | 3 | *MARINER 320D* | 1.68 | 1.29 |
| 2 | 3 | *MARINER 320E-1* | 1.14 | 1.06 |
| 3 | 3 | *VERTICUS* $1^{39}$ | 1.13 | 1.09 |
| Periodically inoperative systems | | | | |
| 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 |
| Completely inoperative systems | | | | |
| 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.

Calculated process capability indicators for the analysed systems as listed in tab. 5 with regard to the fulfilment of critical quality requirements $CTQ$ in relation to $H_2O$ content with reference to the requirements for class II breathing air at the level of $C_{H_2O} \in [LSL = 0;\ USL = 5.0 \cdot 10^{-2} g \cdot m^{-3}]$ are collectively presented in tab. 6. The completely inoperative systems require rotation.

## ARCHIVE DATA ANALYSIS

In concord with the adopted procedure, all records of critical measurements for compression and filtration systems made in the years 2002-2006 were collected in the laboratory measurement database. It provided the basis for analysing the effects of introduced

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 nieprawidłowe[40] 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. Pomiary przedstawiono w sposób chronologiczny w kolejności ich obserwacji.

changes in the process improvement phase. The results of the measurements obtained in 2002 are presented in Fig. 8. Two groups of outliers were determined, which were marked with a red line. After identifying the reasons and the lack of economic, organisational or technical justification, the least efficient systems were eliminated and replaced with more modern ones.

Fig. 9 presents the distribution of $H_2O$ content measurement results in 2003, whereas Fig.10 in 2004, the circled areas present laboratory measurement results showing the identified incorrect indications[40] of the $OEM-7$ laboratory electrolyte moisture meter. The same distribution is presented on the control chart – Fig. 11. Fig. 12 indicates the measurements that were made for naval hyperbaric systems, and then incorrectly included in the measurement database of compression and filtration systems.

The results of measurements of hyperbaric systems showed contamination of storage and distribution systems. Fig. 14–15 present a summary of the value of measurements carried out in the years 2002-2006 before and after the elimination of outliers or incorrectly qualified values. From the initial number of 861 measurements of $H_2O$ content, after an elimination for further analysis and statistical inference at the stage of process improvement, 817 measurements were left. Fig. 13 presents a summary of measurement data obtained in the years 2002-2006. The measurements are presented chronologically in the order of their observations.

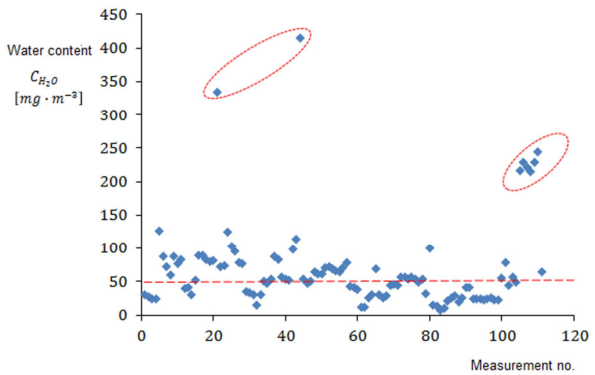


Fig. 8 Scatter diagram of $H_2O$ content measurement results in 2002: $\bar{x} = 6.27 \cdot 10^{-2} g \cdot m^{-3}$, $n = 111$, $LSL = 0$, $USL = 5.0 \cdot 10^{-2} g \cdot m^{-3}$.

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

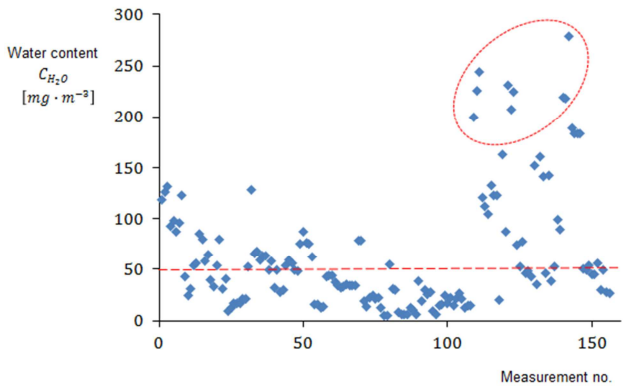


Fig. 9 Scatter diagram of $H_2O$ content measurement results in 2003 after the elimination of $ST-1-125$ compressor: $\bar{x} = 6.4 \cdot 10^{-2} g \cdot m^{-3}$, $n = 156$, $LSL = 0$, $USL = 5.0 \cdot 10^{-2} g \cdot m^{-3}$.

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

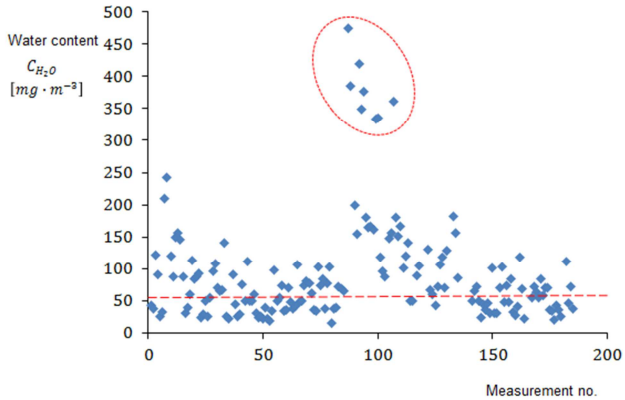


Fig. 10 Scatter diagram for $H_2O$ content measurements in 2004 r.: $\bar{x} = 8.94 \cdot 10^{-2} g \cdot m^{-3}$, $n = 166$, $LSL = 0$, $USL = 5.0 \cdot 10^{-2} g \cdot m^{-3}$.

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

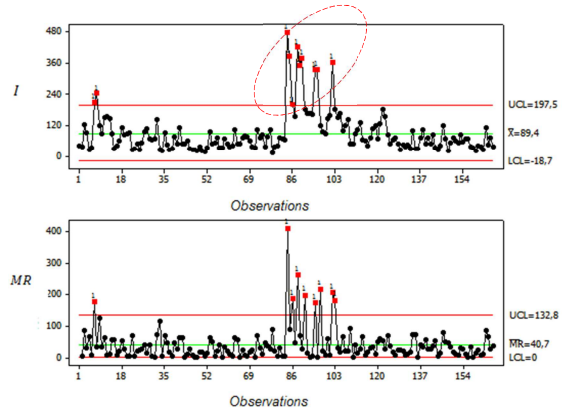


Fig. 11 Control chart $IX - MR$ for $H_2O$ measurement contents in 2004 with the erroneous measurements $OEM - 7$ in the circle.

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

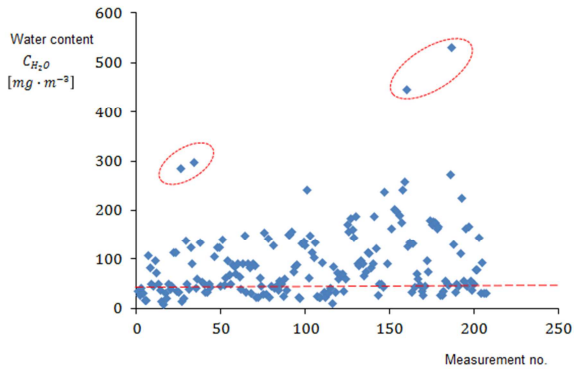


Fig. 12 Scatter diagram for $H_2O$ content measurements in 2005: $\bar{x} = 8.84 \cdot 10^{-2} g \cdot m^{-3}$, $n = 200$, $LSL = 0$, $USL = 5.0 \cdot 10^{-2} g \cdot m^{-3}$.

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

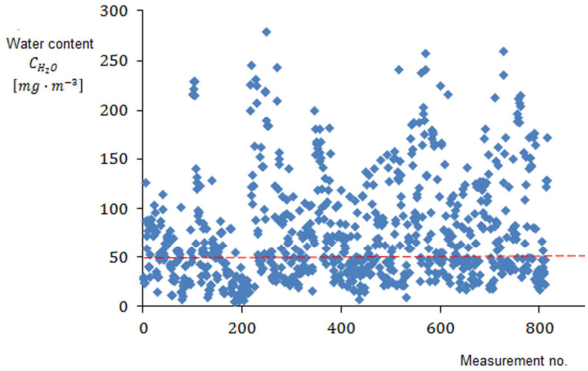


Fig. 13 Chronological summary of $H_2O$ content results in the years 2002–2006 constituting a comparative distribution for the inference regarding future changes in technology.

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

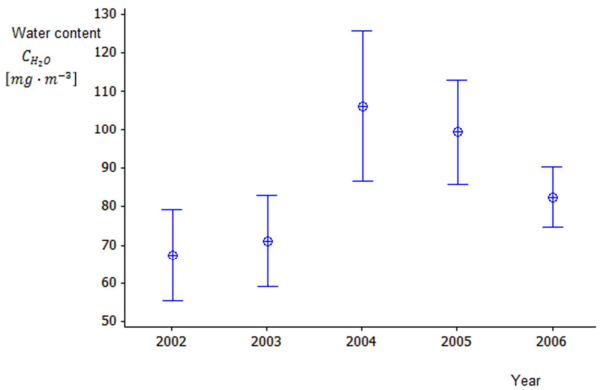


Fig. 14 Mean values diagram with the absolute error $\bar{x} \pm \Delta x(P = 0.95)$ for $H_2O$ content measurements in particular years in the period between 2002–2006.

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.

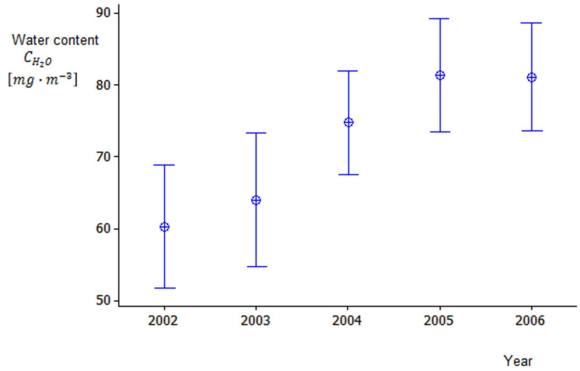


Fig. 15 Mean values along with the absolute error $\bar{x} \pm \Delta x(P = 0.95)$ for $H_2O$ content measurements in the years 2002–2006 after the elimination of outliers.

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 wiarogodnych stochastycznych rozkładów praktycznych. Prowadząc przez około piętnaście lat systemowe obserwacje, udało się zebrać na tyle bogaty materiał eksperymentalny, że takie wnioskowanie stało się możliwe[41].

## 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 $Y_{FT} \gtrsim 90\%$. 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 analiz[44] $DPMO < 1350$. Wartość $Y_{Tp}$ nazywana jest wydajnością cyklu produkcyjnego[45] 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: $p(k,\lambda) = \frac{\lambda^k \cdot e^{-\lambda}}{k!}$, gdzie $\lambda$ 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: $p(k=0,\lambda) = \frac{\lambda^k \cdot e^{-\lambda}}{k!}\Big|_{k=0} = e^{-\lambda}$.

Most $H_2O$ measurements performed in 2002-2006 are above the required upper specification limit, and their distribution after removing the outliers for which a deterministic cause has been found, can be considered as stochastic and accepted as a practical distribution for statistical inference.

Such an inference is extremely rarely applied due to the lack of data allowing to build reliable stochastic practical distributions. By conducting systemic observations for about fifteen years, it was possible to collect a rich enough experimental material enabling this type of inference[41].

## PROCESS YIELD

The average occurrence of non-compliances with regard to $H_2O$ in the years 2002–2004 was below 10%, which corresponds to ca 2,78$\sigma$[42],i.e. process yield $Y_{FT}$[43] defined as a product approved in the first attempt is approximately $Y_{FT} \gtrsim 90\%$. This is an unsatisfactory level that requires changes, because, as can be assumed on the basis of analysis, it is already practically under statistical control and apart from the change in technology, there is no other method of increasing the process's capability. The solution to the problem consisting in the possibility of making a technological leap thanks to the application of newer compression and filtration systems was hindered by the financial and time-related barriers.

Due to the lack of funds, it was necessary to focus on process rationalisation consisting in a systematic implementation of group 2 modernisation solutions and, to a limited extent, the provision of new compression and filtration systems from group 3 in order to improve the quality of the process of supply of breathing air for hyperbaric conditions. Modernisation solutions give the possibility of a partial improvement of the process until the financial barrier allowing for the technological leap is overcome. The use of new compression systems may bring us closer towards the fulfilment of quality requirements in the minimum range of $4.5 \cdot \sigma$, which according to tab. 7 corresponds to the process yield at the level of $Y_{Tp} > 99.87\%$ and the number of defects per one million performed analyzes[44] of $DPMO < 1350$.

The $Y_{Tp}$value is referred to as production cycle yield[45] and constitutes the probability $p$ of an occurrence of an event consisting in the absence of defects $k = 0$ in a considered period of time. To estimate this probability, *Poisson's theoretical distribution* is used, as incidents involving an occurrence of non-compliances are relatively rare and hence considered to be mutually independent.

The *Poisson distribution* is a limit binomial distribution for rare events and takes the form of a formula: $(k,\lambda) = \frac{\lambda^k \cdot e^{-\lambda}}{k!}$, where λ is the expected number of incidents involving a non-compliance, which can be calculated as a frequency probability of $\lambda = 1 - \frac{DPMO}{10^6}$.

In the considered case $\lambda = 0.00135$, and the probability formula can be reduced as follows: $p(k=0,\lambda) = \frac{\lambda^k \cdot e^{-\lambda}}{k!}\Big|_{k=0} = e^{-\lambda}$.

Such yield $Y_{Tp} \equiv p(k=0,\lambda)$ will in this case amount to $Y_{Tp} = e^{-0.0013} \cong 0.998$. Quality measurements for the $Six\ Sigma$ method are presented in tab.7

Wydajność ta $Y_{Tp} \equiv p(k = 0, \lambda)$ w rozpatrywanym przypadku wyniesie $Y_{Tp} = e^{-0,0013} \cong 0,998$. Miary jakości dla metody $Six\ Sigma$ przedstawiono w tab. 7

Tab. 7

The share of non-compliances as percentages and parts per million $ppm$ in the function of multiplied factor of normal standard deviations $\sigma$.

Udział niezgodności w procentach i częściach na milion $ppm$ w funkcji krotności normalnych odchyleń standardowych $\sigma$.

| Standard deviation factor | $DPMO$ non-compliances | $Y_{FT}$ non-compliances |
|---|---|---|
| $1\sigma$ | 691462 $ppm$ | 31% |
| $2\sigma$ | 308538 $ppm$ | 69.2% |
| $2.5\sigma$ | 158655 $ppm$ | 84.2% |
| $2.8\sigma$ | 96800 $ppm$ | 90.3% |
| $3\sigma$ | 66807 $ppm$ | 93.3% |
| $4\sigma$ | 6210 $ppm$ | 99.4% |
| $4.5\sigma$ | 1350 $ppm$ | 99.87% |
| $5\sigma$ | 233 $ppm$ | 99.977% |
| $6\sigma$ | 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 $\alpha_0$ 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 $\alpha_0(kr) < 0,05$.

## RESULTS

The following is a summary of the results of tests on breathing air for hyperbaric purposes carried out in the years 2002-2007. At that time, the breathing air intended for hyperbaric purposes was still different from the established $CTQ$ quality requirements, although as a consequence of the implemented modernisation works a marked improvement was achieved. In fig. 17, the inference based on the standard uncertainty $k = 1$ ($p \cong 0.68$) was assumed, in contrast to fig. 16, where the statistical inference based on the expanded uncertainty $k = 2$ ($p \cong 0.95$) was applied.

The comparison between fig. 16 and fig. 17 shows that the inference based on theoretical normal distribution does not allow to indisputably state that the result from 2007 differs from earlier measurements, as the significance $\alpha_0$ for this inference is included in the range of $\alpha_0 \in [0.05; 0.32]$ and is too high in relation to the commonly accepted critical value $\alpha_0(kr) < 0.05$.

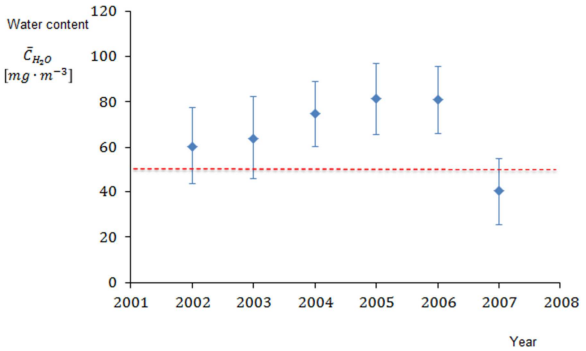


Fig. 16 The diagram of mean values of $H_2O$ content measurements with expanded uncertainty $\bar{C}_{H_2O} \pm \Delta\bar{C}_{H_2O}(k = 2)$ for normal distribution.

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.

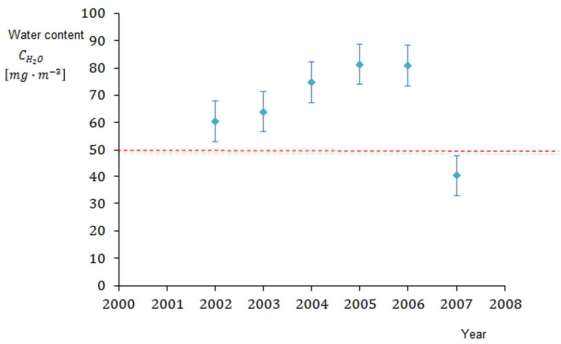


Fig. 17 The diagram of mean values of $H_2O$ content measurements with standard uncertainty $\bar{C}_{H_2O} \pm \Delta\bar{C}_{H_2O}(k = 1)$ for normal distribution.

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 błędu przypadkowego i systematycznego może być prowadzone jedynie wtedy, gdy do dyspozycji pozostaje dostatecznie dużo danych historycznych tworzących rozkład praktyczny analizowanej zmiennej losowej.

## WNIOSKOWANIE

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 $\bar{x}_{2007}(n = 119) \cong 0{,}403\ g \cdot m^{-3}$ otrzymana dla 2007 roku lub niższa. Można stwierdzić, że nie występowała ona w ogóle. Wynika stąd, że intuicyjnie obserwowana wyraźna zmiana dla 2007roku, 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.

This is due to the degeneration of data containing a comparable level of random and systematic errors. Systematic variability is related to the different configuration of systems for which the measurement results are averaged. A typical statistical inference for a large sample of $N > 30$ is usually based on a normal distribution. The assumption of normality of distribution comes from the adopted minimisation of systematic variability to at least a lesser order than that of accidental variation, which can be treated as "white noise" with a normal distribution. The proposed inference in the area of a comparable level of an accidental and systematic error can only be carried out if there is enough historical data available making up the practical distribution of the random variable analysed.

## INFERENCE

Sets of test results for the content of $H_2O$ in the breathing air until 2006 can be used to create a practical distribution model. The $N = 818$ base of measurement results was collected with regard to the used systems to provide the breathing air for hyperbaric conditions from the years 2002 to 2006. In the inference for the year 2007, in which $n = 119$ measurements were made, for the purposes of the base of historical measurements it is required to select consecutive measurements and calculate their average value.

Then, moving by one measurement, another average value should be calculated. This way we will obtain the following empirical distribution of mean values: $m = N - n - 1 = 698$ – fig. 18. Next, the question was posed how often in the past the mean $\bar{x}_{2007}$ $(n = 119) \cong 0.403\ g \cdot m^{-3}$ occurred that was obtained in 2007 or a lower value. It is possible to observe that it had not occurred at all. Thus, it results that the intuitively observed clear change in 2007 is fully confirmed by the inference based on empirical distribution.

Conducting the above inference did not allow to determine its significance on the basis of the frequency probability $p$ , because the number of cases $n$ of an occurrence of the observed difference in 2007 amounted to $n = 0$. For this reason, the inference was repeated for subsequent quarters of 2007, following the same procedure as before.

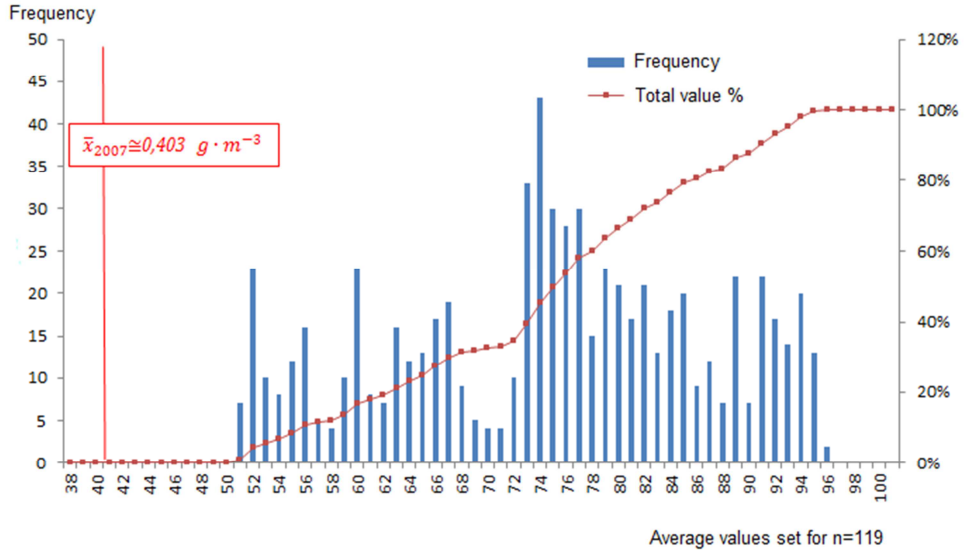


Fig. 18 Histogram of frequency of occurrence of average $H_2O$ measurement values in the years 2002–2006 and the average value in 2007 for $n = 119$ and the average $\bar{x}_{2007}(l = 119) \cong 0.403\ g \cdot m^{-3}$.

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 $\bar{x}_{2007}(l = 119) \cong 0{,}403\ g \cdot m^{-3}$.

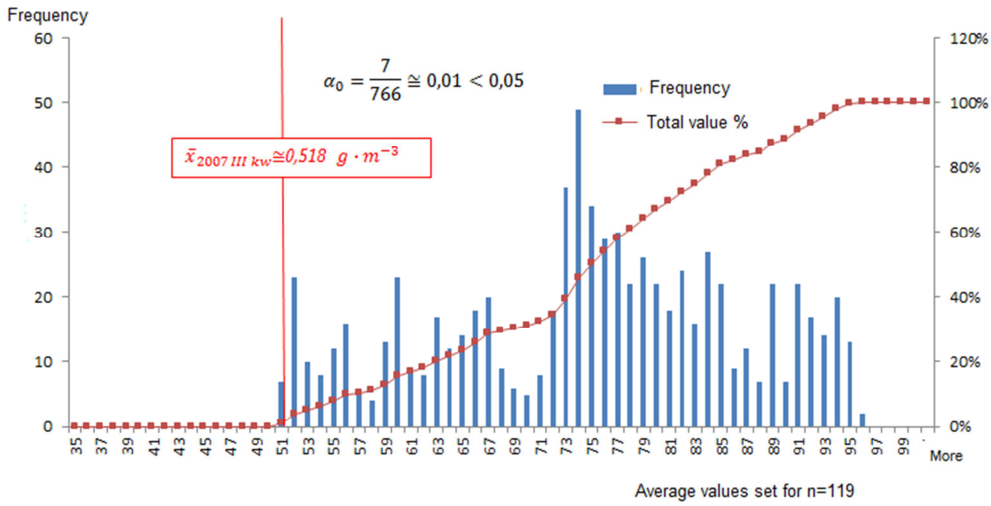


Fig. 19 The histogram of frequency of occurrence of average $H_2O$ measurement values in the years 2002–2006 and for the 3rd quarter of 2017 for $n$ = 27 and the average $\bar{x}_{III\ 2007}(l = 27) \cong 0.518\ g \cdot m^{-3}$

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 $\bar{x}_{III\ 2007}$ $(l = 27) \cong 0{,}518\ g \cdot m^{-3}$.

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

Stąd częstościowe prawdopodobieństwo $p$ występowania wartości $\bar{x}_{III\ 2007}(l = 27) = 0{,}5183\ g \cdot m^{-3}$ 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 2007r. 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.

In the 3rd quarter of 2007 the average value $\bar{x}_{III\ 2007}(l = 27) = 0.5183\ g \cdot m^{-3}$ was obtained for the sample with $l = 27$. In the case of a practical distribution with the size of $k = 766$ the result was the same or smaller by $o = 7$ times – fig. 19.

Hence the frequency probability $p$ of an occurrence of the value $\bar{x}_{III\ 2007}(l = 27) = 0.5183\ g \cdot m^{-3}$ amounts to $p = \frac{o}{k} = \frac{7}{766} \cong 0.01$. Assuming that the probability $p$ is statistically average, it is possible to adopt the significance level of the conducted statistical inference of $\alpha_0 \leq 0.01$. Based on a practical distribution for 2007, at the confidence level $\bar{P} > 99\%$, the differentiating effect was observed of actions undertaken in relation to changes in technology towards a clear improvement in meeting the quality requirements $CTQ$ with regard to $H_2O$ content in the breathing air. A similar analysis was carried out in relation to $CO_2$ content.

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. Sprawdzono, jak często występowała wartość średnia z 2007 roku $\bar{x}_{2007}(l = 119) = 0{,}03\%_v$ 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 $\alpha_0$ 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 $\alpha_0 \leq 0{,}34$.

The inference based on a practical distribution, as in the case of $H_2O$ content, used the conducted $CO_2$ measurements. The base of $N = 871$ average measurement results was collected for the operated systems of supply of breathing air for hyperbaric conditions in the years 2002–2006. While performing the inference for 2007 $n = 119$ measurements on $CO_2$ content were made and an empirical distribution was created with the count of $m = N - n - 1 = 751$ – fig. 20. The frequency of an occurrence of the average value $\bar{x}_{2007}(l = 119) = 0.03\%_v$ or a smaller value was checked in the empirical distribution, from $k = 751$ average values from the practical distribution for a simple sample with the count of $l = 119$. The obtained average value $\bar{x}_{2007}(l = 119) \cong 0.03\%_v$ for 2007 was previously obtained $o = 259$ times – fig. 20. Therefore, the frequency probability $p$ of an occurrence of value $\bar{x}_{2007}(l = 119) = 0.03\%_{v/v}$ is $p = \frac{o}{k} = \frac{259}{751} \cong 0.34$.

Assuming that the probability $p$ is statistically average, it is possible to adopt the significance level of the conducted statistical inference of $\alpha_0 \leq 0.34$. This means that from the statistical point of view there is no reason to believe that in 2007 a statistically significant change was observed with the possibility of making an $I$ error of $\alpha_0$ type consisting in the rejection of the true zero hypothesis $H_0$ of the lack of an occurrence of a difference in a simple sample in 2007 in relation to years 2002–2006 at the level $\alpha_0 \leq 0.34$.

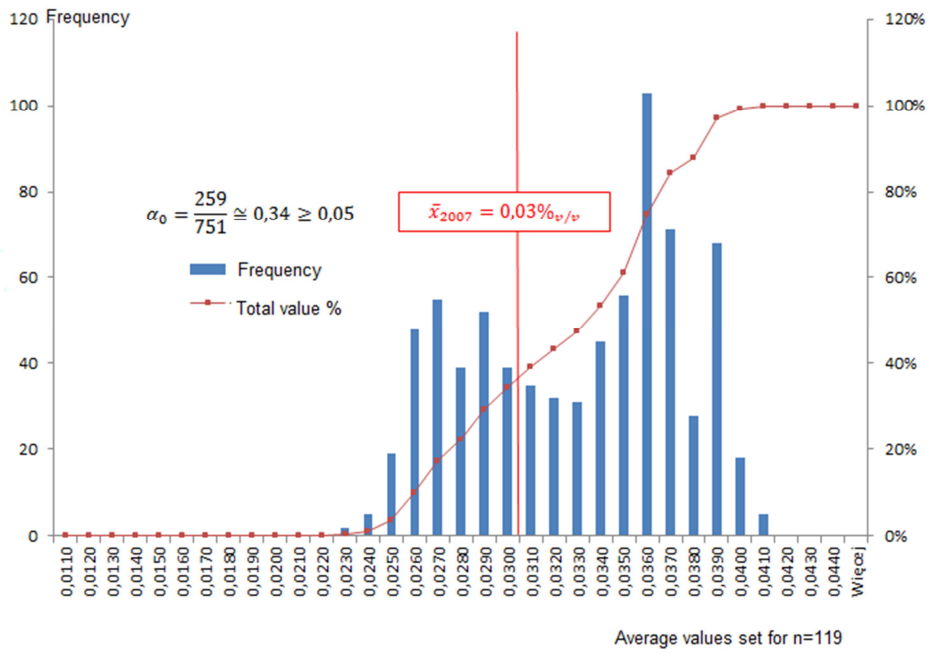


Fig. 20 The histogram of average values of $CO_2$ measurement values in the years 2002–2006 and the average $\bar{x}_{2007}\ (l = 119) = 0.03\%_v$.

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 $CTQ$.

Based on the practical distribution for 2007, no differentiating effect was noted in relation to the actions undertaken with regard to the changes in technology towards a clear improvement in the fulfilment of quality requirements $CTQ$ regarding $CO_2$ content in the breathing air approved for hyperbaric conditions, contrary to the content of $H_2O$.

The conducted statistical inferences for other years and other pollutants did not show a significant change towards ensuring the conditions to meet the quality requirements $CTQ$ at a higher level than in the comparative period. It is only possible to notice a slow, successive improvement towards a better fulfilment of the quality requirements $CTQ$.

## PROCESS CONTROL

The validation process verified the process efficiency and the level of fulfilment of quality requirements $CTQ$ by the product. Fig. 21 presents the distribution of mean values $\bar{x}_{2006-2013}$ of process control measurements with regard to $H_2O$ content in relation to normal distribution with the coverage factor $k = 2$. The reduction of $\bar{C}_{H_2O}$ content in the monitoring phase is of permanent character and the obtained responses of a modernised systems are qualitatively better than in the years 2002–2006. Based on the distribution of mean values $\bar{x}_{2002-2013}$ of measurements two groups of measurements were obtained: group I for years $l \in (2002 - 2006)$ and group II for $l \in (2007 - 2013)$.

As a result of the conducted statistical inference it was previously possible to indicate qualitative changes in $H_2O$ content measurements which occurred in the years 2006–2007. In subsequent years further system improvements took place, which is confirmed by the differences between the observations from years $l \in (2007 - 2008)$ and 2009. Since 2009, the obtained measurement results in the majority of new and modernised systems remain within the limits set by the quality requirements $CTQ$.

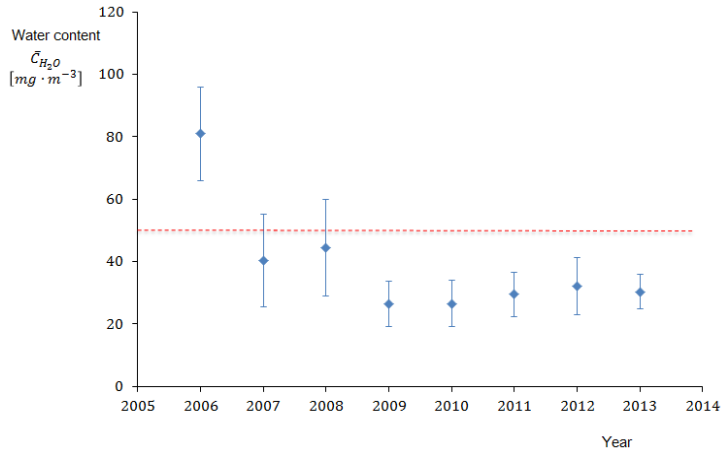


Fig. 21 The diagram of average values of $H_2O$ content measurements with extended uncertainty $\bar{C}_{H_2O} \pm \Delta\bar{C}_{H_2O}(k = 2)$, for the inference based on a normal distribution.

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.

It was assumed that at the current technological level it would be satisfactory to meet the critical quality requirements $CTQ$ in the first attempt $Y_{FT}$, i.e. with the process yield level of $Y_{FT} \geq 90\%$, which corresponds to approximately $\sigma \cong 2.8$. This level was periodically achieved: $Y_{FT} = 100 - 8.84 \geq 91.16\%$ – fig. 22.

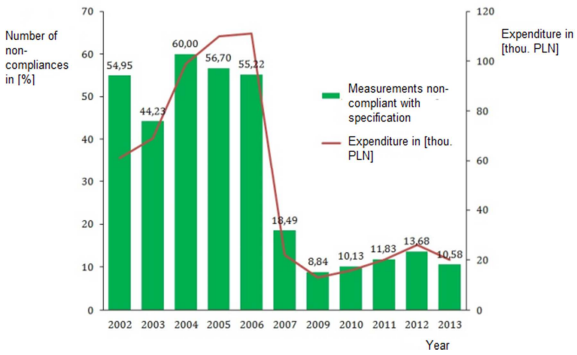


Fig. 22 Number of non-compliances and resources allocated due to the necessity of carrying out a repeated air analysis in the years 2002–2013.

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

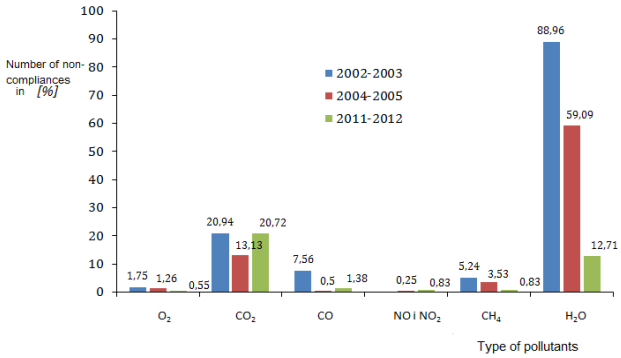


Fig. 23 Changes in the number of non-compliances for particular groups of pollutants with the division into selected periods in the years 2002–2012.

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 laboratoryjnych[46] 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 stosownej technologii. Dalszą poprawę można osiągnąć jedynie poprzez jej zmianę.

In 2009-2013, the share of non-compliant samples was below $Y_{FT} < 14\%$. The decreasing number of non-compliances resulted in measurable financial savings resulting from the lack of necessity to perform laboratory re-analyses[46] of products. Fig. 23 shows the number of non-compliances regarding the content of particular breathing air pollutants obtained in the years 2002-2013.

The reduction of the number of non-compliances in the content of $H_2O$ was not accompanied by a proportional reduction in the number of defects in $CO_2$content. This indicates limitations of the currently used technology. Further improvement can only be achieved by its modification.

## 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 $6\sigma$.

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

## SUMMARY

In the course of the research and implementation carried out in the years 2002–2017, the achieved capability of the process of production, storage and distribution of breathing air approved for use in hyperbaric conditions in the *Polish Armed Forces* was between $2.5\sigma - 3.0\sigma$ – tab. 7.

It was demonstrated that the implementation of the work objective can be accomplished in an effective way using the methods of the $SixSigma$ approach, with the purpose of diagnosis of the scope of the necessary modernisation at each stage of the works as the basic project task. In the rationalisation of production processes it is assumed to strive towards permanent exceedance of the level of $6\sigma$.

While conducting observations of the process of production, storage and distribution of the breathing air approved for use in hyperbaric conditions in the *Polish Armed Forces*, one can safely conclude that with the current state of the available technology, it is not possible to achieve such a level of process capability for the whole system.

On the other hand, when looking at the technical

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 3$\sigma$ 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.

solutions and descriptions of the technology available on the market, it seems that achieving the process capability of 4.5$\sigma$ should be within reach provided that sufficient investment funds are available.

## FINAL CONCLUSIONS

As a result of the project, important conclusions have been drawn that stand in opposition to the widely accepted beliefs:

1. The current technique and operating conditions do not allow to achieve the capability for production, storage and distribution of the breathing air intended for hyperbaric oxygen conditions higher than 3$\sigma$. The history of compression devices, drive motors and typical installations of chemical engineering is long and abounds in revolutionary changes in technology. When looking at systems for the production, storage and distribution of the breathing air for hyperbaric conditions, it is difficult to resist the impression that these devices represent the mainstream of the technical progress. If we were to ask engineers to vote on the level of capability of this process on the basis of an overview of the available technique, a small percentage of them would be sceptical with regard to the thesis that they do not guarantee the capability level of 4.5$\sigma$. However, it appears that this is not possible when it comes to the fulfilment of critical quality requirements $CTQ$ or $NATO$ standards. It seems that these requirements have been adopted without sufficient knowledge of the needs and state of technology. It can be safely said that the standards that were in force in Poland before joining $NATO$ were more pragmatic, excluding the fire safety issues.
2. Due to the relatively low capability of the process of production, storage and distribution of breathing air for hyperbaric conditions it is not possible to resign from laboratory quality control.
3. Investing in the modernisation and rotation of obsolete technology does not currently lead to an increase in the capability of the process of production, storage and distribution of breathing air intended for hyperbaric oxygen conditions.

It seems quite unbelievable that the current stage of equipment rotation and replacement with newer systems does not bring a rapid quality improvement from the point of view of the process of production, storage and distribution of breathing air for hyperbaric purposes in the Polish Armed Forces. Presumably, this is an effect of the scale factor as today's investments constitute a small fraction in relation to the number of devices used.

## REFERENCES


1. Woźniak A. Breathing air purification for hyperbaric purposes. Polish Hyperbaric Research. 3, 2014, 48, pp. 49-58. HTTP://DX.DOI.ORG/10.13006/PHR.48.4.
2. NO-07-A005. Diving for military purposes. Breathing mixes. Classification, requirements and research. Warsaw: WCNJK, 2010.
3. Kłos R. Diving apparatuses with breathing mix regeneration. Poznań : COOPgraf, 2000. ISBN 83-909187-2-2.
4. Kłos R. Submarine life support systems. Gdynia: The Polish Society of Hyperbaric Medicine and Technique, 2008. p. 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. Instruction on military rescue operations at sea for the Polish Navy. Gdynia: Marynarka Wojenna RP, 2012. Sygn. Mar. Woj. 1361/2012 DMW.
7. Wrzos B. Production and characterisation of gas mixes of for special purposes. Gdańsk: Politechnika Gdańska, 2011. Doctoral dissertation.
8. Marynarka Wojenna RP (Polish Navy). Norms regarding the allocation of equipment in marine rescue services of the Polish Navy. Warsaw: lack of the author's name, 2014.
9. Woźniak A. Analysis of the process of production of breathing air for hyperbaric purposes. Gdynia: PTMiTH, 2017. ISBN 978-83-938-322-4-8.
10. Woźniak A. Breathing air purification for hyperbaric purposes p.II. Polish Hyperbaric Research. 1, 2015, 50, pp. 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. Statistical process control-quality improvement with the Statistica package. Cracow: 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. Kłos R. Measurement system reliability assessment. Polish Hyperbaric Research. 2015, Tom 51, 2. http://dx.doi.org/10.1515/phr-2015-0009.



**mgr 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,
[1] Standardisation Agreement – an agreement defining the processes, provisions, conditions concerning common military/technical procedures and equipment,
[2] STANAG 1458 Diving Gas Quality,
[2] STANAG 1458 Diving Gas Quality,
[3] STANAG 1372 ADivP-01(B) Allied Guide to Diving Operations,
[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,
[4] The context is understood as the systemic environment, i.e. the suprasystem to the system ensuring adequate quality of breathing air,
[5] Critical to Quality,
[5] Critical to Quality,
[6] Statistical Process Control,
[6] Statistical Process Control,
[7] (D-Define)definiuj, (M-Measure) zmierz, (A-Analyze) analizuj, (I-Improve) doskonal, (C-Control) kontroluj,
[7] D-Define, M-Measure, A-Analyse, I-Improve, C-Control,
[8] Standard Operational Procedures,
[8] Standard Operational Procedures,
[9] (S-Strenghts) mocne/(W-Weakness) słabe strony, (O-Opportunities) szanse, (T-Threatens) zagrożenia,
[9] S-Strengths/W-Weakness, O-Opportunities, T-Threats,
[10] Quality Function Deployment,
[10] Quality Function Deployment,
[11] Failure Mode and Effects Analysis,
[11] Failure Mode and Effects Analysis,
[12] Statistical Process Control,
[12] Statistical Process Control,
[13] Zastosowanie wybranych kart kontrolnych procesu oraz oszacowanie wskaźników zdolności procesu,
[13] Utilisation of selected process control charts and estimation of process capability indicators,
[14] Zrezygnowano z metod statystycznego projektowania eksperymentów ze względu na stosunkowo dobrze poznane mechanizmy i modele zachodzących podczas eksperymentów zmian,
[14] It was decided to refrain from using statistical experiment design methods due to relatively well-known mechanisms and models of changes occurring during the experiments,
[15] Faza algorytmu postepowania,
[15] Procedure algorithm phase,
[16] Nadsystemu,
[16] Suprasystem,
[17] Za które przyjęto dziesięć podstawowych warunków: rzetelność/dokładność, aktualność, adekwatność, kompatybilność, bezobsługowość, wydajność, niezawodność, mobilność, doświadczenie/SOP, redundancję,
[17] i.e. the following ten basic conditions: precision, currency, adequacy, compatibility, maintenance-freeness, efficiency, reliability, mobility, experience/SOP, redundancy,
[18] Quality Function Deployment,
[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,
[19] Diagnosis is understood as a formulation of conclusions regarding system condition on the basis of examination of processes occurring in it or only of their effects, usually allowing the formulation of prospective recommendations,
[20] Failure Mode and Effects Analysis,
[20] Failure Mode and Effects Analysis,
[21] Spodziewanych jest wiele interakcji,
[21] Numerous interactions are expected,
[22] Stwarzające w przeszłości najwięcej problemów w procesie zapewnienia jakości dla powietrza hiperbarycznego, ze względu na największą liczbę występujących przekroczeń zawartości $CO_2$ oraz $H_2O$ w laboratoryjnych badaniach okresowych,
[22] Which in the past posed the majority of problems in the process of ensuring quality of hyperbaric air due to the greatest number of exceedances of $CO_2$ and $H_2O$ levels in laboratory periodic tests,

[23]. SECURUS Bauer System,
[23]. SECURUS Bauer System,
[24]. Statistical Process Control,
[24]. Statistical Process Control,
[25]. DGT (LCL) – dolna granica tolerancji,
[25]. DGT (LCL) – lower tolerance limit. – LCL stands for Lower Control Limit,
[26]. GGT (UCL) – górna granica tolerancji,
[26]. GGT (UCL) – upper tolerance limit. – UCL stands for Upper Control Limit,
[27]. Gdy dane pomiarowe nie podlegają rozkładowi normalnemu należy dopasować inny rozkład lub wykonać ich transformacje np. Johnsona, Boxa-Coxa,
[27]. When the measurement data do not fall within the normal distribution it is required to match them with a different distribution or perform their transformations, e.g. Johnson's, Box-Cox's,
[28]. Anderson-Darling test,
[28]. Anderson-Darling test,
[29]. Control Chart,
[29]. Control Chart,
[30]. Moving Range – karta ruchomego rozstępu, gdzie rozstęp to wartość bezwzględna różnicy pomiędzy dwoma kolejnymi pomiarami w sąsiednich próbkach,
[30]. Moving Range – a chart where the range is an absolute value of the difference between two consecutive measurements in neighbouring samples,
[31]. Górna linia kontrolna,
[31]. Upper control line,
[32]. Należy przez to rozumieć, że zostały skompensowane błędy systematyczne, a w procesie można jedynie zaobserwować błędy przypadkowe przy stosowanych dokładnościach prowadzenia obserwacji,
[32]. It should be understood that systematic errors have been compensated for, and in the process, it is possible to observe only incidental errors in relation to the applied accuracies of the conducted observations,
[33]. Górna granica ostrzegania $\geq 2 \cdot \bar{s}$,
[33]. Upper warning limit $\geq 2 \cdot \bar{s}$,
[34]. W skrajnie niewydolnych procesach, jeśli poprawa wskaźnika $C_p$ jest niemożliwa, należy podjąć działania w celu całkowitej zmiany procesu, np. poprzez wymianę maszyny,
[34]. If in extremely inefficient processes, the improvement of the $C_p$ index is impossible, actions should be taken to completely change the process, e.g. by replacing the machine,
[35]. Poprawa wskaźnika $C_{pk}$ zazwyczaj jest możliwa do realizacji przez operatora,
[35]. An improvement of $C_{pk}$ index is usually possible to achieve by operator,
[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. $\mathrm{GM\ lub\ Ford}$, przyjmuje się wartość wskaźników zdolności na poziomie co najmniej $C_p, C_{pk} > 1{,}67$,
[36]. If possible, it is recommended that the value of the $C_{pk}$ index is equal to $C_{pk} > 1.33$. In companies for which product quality is a priority, such as $\mathrm{GM\ lub\ Ford}$, the value of capability indicators should at least be equal to $C_p, C_{pk} > 1.67$,
[37]. Np. po zakupie i montażu,
[37]. E.g. after the purchase and installation,
[38]. Np. przed rozpoczęciem produkcji seryjnej,
[38]. E.g. before the commencement of serial production,
[39]. Wskaźniki kontrolne po odrzuceniu dwóch pomiarów błędnych (błąd obsługi),
[39]. Control indicators after the rejection of two erroneous measurements (operator's mistakes),
[40]. Awaria urządzenia,
[40]. Equipment failure,
[41]. Nie wyklucza to prowadzenia wnioskowania opartego na rozkładach teoretycznych,
[41]. This does not eliminate the possibility to conduct inference based on theoretical distributions.
[42]. Miara jakości w $6\sigma$ tzw. Sigma quality level,
[42]. Quality measurement in $6\sigma$, i.e. Sigma quality level,
[43]. Final Yield,
[43]. Final Yield,
[44]. Defects per million opportunities,
[44]. Defects per million opportunities,
[45]. Throughput Yield,
[45]. Throughput Yield,
[46]. Udział niezgodności można rozpatrywać w kontekście nadplanowych nakładów finansowych związanych z wymaganym wykonaniem ponownej analizy kontrolnej po korekcji systemu,
[46]. The share of non-compliances may can be considered in the context of over-estimated funds related to the required performance of a re-analysis following system correction.