

Prototyp innowacyjnego, centralnego systemu monitoringu źródeł gazów medycznych

Jakub Michalik, Marcin Hojny

AGH Akademia Górniczo-Hutnicza, Wydział Inżynierii Metali i Informatyki Przemysłowej, Katedra Informatyki Stosowanej i Modelowania, al. A. Mickiewicza 30 30-059 Kraków

Streszczenie: W artykule przedstawiono założenia projektu i implementację systemu monitoringu instalacji gazów medycznych, ze szczególnym uwzględnieniem ich źródeł. System koncentruje się na monitorowaniu kluczowych elementów infrastruktury, takich jak stacja sprężonego powietrza medycznego i technicznego, stacja pomp próżniowych. Głównym celem było stworzenie scentralizowanego systemu monitoringu z intuicyjnym interfejsem użytkownika, stanowiącego pierwszy etap w kierunku implementacji kompleksowego rozwiązania chmurowego na skalę krajową oraz kolekcjonowania danych na potrzeby późniejszego wykorzystania w trenowaniu algorytmów predykcyjnych AI. Opracowany prototyp integruje urządzenia różnych producentów, wykorzystując protokoły komunikacyjne RS-485 MODBUS oraz analogowe czujniki ciśnienia. System wykorzystuje infrastrukturę chmurową jako centrum danych, transmisję MQTT oraz bazę danych przystosowaną do gromadzenia znacznych ilości danych – szeregów czasowych. Wdrożony prototyp umożliwia szybką analizę danych, stałą obserwację, powiadamianie oraz podejmowanie natychmiastowych działań w przypadku awarii. Stanowi on fundamentalny krok w kierunku stworzenia ogólnokrajowego systemu monitoringu instalacji gazów medycznych, co może znacząco przyczynić się do podniesienia standardów opieki zdrowotnej i bezpieczeństwa w obiektach szpitalnych.

Słowa kluczowe: gazy medyczne, systemy alarmowe gazów medycznych, systemy monitorowania, IoT, instalacje gazów medycznych, monitoring instalacji gazów medycznych, smart hospital, IoT w medycynie

1. Wprowadzenie

Instalacje gazów medycznych to krytyczna infrastruktura obiektów szpitalnych składająca się z wielu urządzeń oraz rurociągów, w tym czujników i zaworów, wykorzystywana do dostarczania leczniczych gazów medycznych do punktów poboru gazów w placówkach medycznych [4]. Podstawową normą europejską definiującą wytyczne projektowania, montażu oraz testów i badań wyżej wymienionych instalacji jest PN-EN ISO 7396-1:2016. Mianem gazu medycznego określić można takie gazy lub mieszaniny jak: tlen medyczny (ozn. O), podtlenek azotu (ozn. N), dwutlenek węgla (ozn. C), sprężone powietrze medyczne (ozn. A), sprężone powietrze do napędu narzędzi chirurgicznych (ozn. Am), próżnia (podciśnienie – ozn. V) [1, 5, A1].

Zgodnie z wymaganiami normy PN-EN ISO 7396-1:2016 (rozdział 6) instalacja gazów medycznych powinna być wyposażona w określone systemy alarmowania personelu technicznego, jak

i klinicznego odnośnie stanu instalacji gazów medycznych oraz urządzeń wchodzących w jej skład. Alarmy kliniczne są to ostrzeżenia dla personelu klinicznego o nieprawidłowym funkcjonowaniu instalacji gazów medycznych dla danego gazu medycznego. Alarmy eksploatacyjne to alarmy związane z funkcjonowaniem instalacji oraz źródeł gazów medycznych – między innymi stacji rozprężalni gazów medycznych czy też maszynowni, w skład których wchodzi m.in. sprężarki powietrza medycznego, zespoły uzdatniania i monitorowania jakości wytwarzanego powietrza medycznego czy też pompy próżni medycznej.

Monitoring stanu elementów i urządzeń instalacji jest krytyczny ze względu na udokumentowane przypadki wpływu awarii źródeł gazów medycznych na życie i zdrowie pacjentów [6, 7]. Istnieją wymagania, które definiują ilość niezależnych źródeł gazów w celu zapewnienia bezpieczeństwa – z naciskiem na zapewnienie ciągłości dostaw oraz kontroli stanu instalacji [6, A1]. Centrum każdego systemu rurociągowego są źródła gazów medycznych, gdzie znajdują się m.in. urządzenia monitorujące wartość ciśnienia, aktualnie pracujące źródło (podstawowe/rezerwowe/awaryjne) i inne kluczowe parametry [6].

Miniona pandemia wirusa SARS-CoV-2 ugruntowała znaczenie oraz istotę instalacji gazów medycznych w kontekście zdrowia i życia pacjentów [8]. Aktualne rozwiązania w dziedzinie systemów alarmowo-informacyjnych najczęściej opierają się na systemach alarmów optyczno-akustycznych oraz odczycie i prezentacji jedynie wartości ciśnień gazów dla poszczególnych urządzeń wchodzących w skład pomieszczenia źródła danego gazu medycznego [15, A1]. Na podstawie przeglądu literaturowego

Autor korespondujący:

Jakub Michalik, jrmichalik@agh.edu.pl

Artykuł recenzowany

nadesłany 15.12.2025 r., przyjęty do druku 19.06.2026 r.



Zezwala się na korzystanie z artykułu na warunkach licencji Creative Commons Uznanie autorstwa 4.0 Int.

istniejących rozwiązań zaobserwowano, iż aktualne rozwiązania bazują na niezunifikowanych systemach monitorowania parametrów pracy źródeł gazów medycznych oraz ciśnień gazów medycznych w poszczególnych lokalizacjach (np. oddziałach) szpitali [3, A2]. Obiekty medyczne nie mają uniwersalnych, zintegrowanych rozwiązań centralnego monitorowania stanu instalacji, łączących zarówno odczyt parametrów pracy źródeł gazów medycznych jak i odczyt parametrów pracy urządzeń wchodzących w skład stacji rozprężalni lub maszynowni [3].

Zaobserwowano również problem dotyczący zbyt częstych fałszywych alarmów (np. alarmów klinicznych) wywołanych chwilowym spadkiem ciśnienia lub przestarzałymi urządzeniami monitorującymi ciśnienie gazów medycznych w poszczególnych strefach gazowych [9]. Z tego powodu personel medyczny niekiedy ignoruje alarmy pojawiające się w systemach alarmowych dla instalacji lub alarmy te są dezaktywowane przez personel techniczny pozbawiając urządzeń sygnałów dźwiękowych – lub co gorsza urządzenia alarmowe pozbawiane są całkowicie zasilania tracąc swoją funkcjonalność powiadamiania o zaniku lub nieprawidłowej pracy instalacji gazów medycznych.

Ze względu na dużą częstotliwość różnorodnych alarmów – 70 % alarmów otrzymanych przez personel medyczny nie powoduje natychmiastowej reakcji, w tym 41 % alarmów dotyczących spraw potencjalnie zagrażających zdrowiu i życiu pacjenta [9]. Systemy ciągłego monitorowania dla krytycznej infrastruktury szpitalnej zwykle nie mają centralnych systemów monitorowania, a korzystają z urządzeń różnych producentów w różnych lokalizacjach [6].

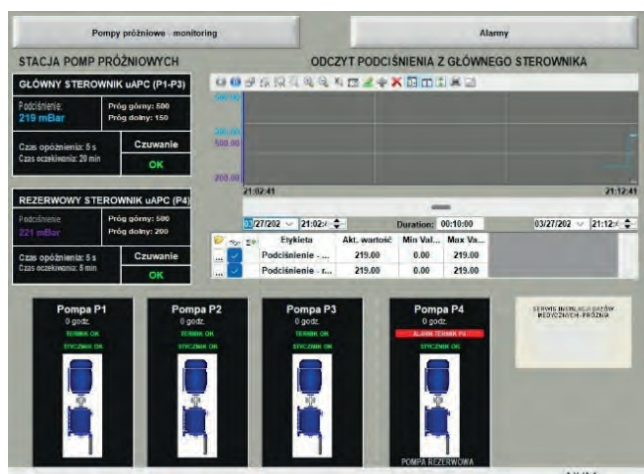
Nadmiar alarmów może paradoksalnie zmniejszyć bezpieczeństwo pacjenta powodując, że ważne alarmy zostaną pominięte [9]. Badania sugerują, iż ważne jest odpowiednie dostosowanie progów alarmowych oraz prezentowanie jedynie kluczowych w kontekście bezpieczeństwa alarmów i powiadomień w prosty i zrozumiały sposób (często zdefiniowany zewnętrznymi normami i standardami – w przypadku systemów monitorowania instalacji gazów medycznych jest to standard IEC 60601-1-8) minimalizując ryzyko „zmęczenia” personelu zbędnymi alarmami [9].

Rozwiązaniami proponowanymi w celu optymalizacji opisanych problemów są między innymi dynamiczne alarmy oparte na algorytmach sztucznej inteligencji – np. adaptacyjne opóźnienia czasowe alarmów, które wykazały potencjał redukcji klinicznie nieistotnych alarmów zwiększając jednocześnie wartość i znaczenie alarmów [10]. Większość elementów wchodzących w skład tej instalacji to certyfikowane wyroby medyczne klasy IIa lub IIb, w zależności od przeznaczenia (w rozumieniu Rozporządzenia Parlamentu Europejskiego i Rady (UE) 2017/745 z dnia 5 kwietnia 2017 r.) [A1, A3]. Dowodzi to, iż prawidłowy nadzór nad całościową instalacją (wyrobem medycznym) jest bardzo istotny w kontekście bezpieczeństwa dla zdrowia i życia pacjenta [11]. Obecne rozwiązania do monitorowania instalacji gazów medycznych (alarmy kliniczne) opierają się na urządzeniach wykorzystujących cyfrowe czujniki ciśnienia, diody LED, buz-

zery (sygnalizatory elektromagnetyczne) oraz niekiedy ekrany dotykowe LCD (rys. 1) [15].

Systemy te mają wiele ograniczeń – utrudniona jest ich integracja z innymi urządzeniami bez tworzenia dedykowanego oprogramowania lub jest niemożliwa ze względu na stosowanie analogowych metod pomiaru [12]. W sytuacjach awaryjnych operatorzy muszą fizycznie docierać do zaworów, punktów monitoringu i stacji centralnych, aby odczytać bieżący alarm lub status instalacji. Tradycyjne rozwiązania nie zapewniają wszechstronnego, zdalnego i centralnego nadzoru [12]. Pojawiają się koncepcyjne rozwiązania umożliwiające transmisję danych ze strefowych czujników ciśnień do systemu centralnego, jednak nie jest to jeszcze powszechne rozwiązanie umożliwiające integrację urządzeń różnych producentów na zasadach plug & play [3].

W przypadku systemów alarmów eksploatacyjnych – dostępne są rozwiązania (szczególnie w większych szpitalach), gdzie placówka medyczna wyposażona w system BMS (ang. *Building Management System*) dołącza do niego monitoring kluczowych urządzeń wchodzących w skład stacji źródeł zasilania gazów – np. sprężarki czy pompy próżniowe (rys. 2). Rozwiązanie to nie jest zgodne z wymaganiami normy EN ISO 7396-1:2016, rozdział 6.



Rys. 2. Przykładowy widok z systemu BMS – monitoring stacji pomp próżni

Fig. 2. Example view from the BMS system - monitoring of the vacuum pump station

1.1. Aktualne systemy monitorowania instalacji gazów medycznych

Aktualne tendencje (stan na 2025 r.) wskazują integrację urządzeń monitorujących oraz IoT z infrastrukturą w chmurze wraz z interfejsami web i centralizację w systemach monitoringu instalacji gazów medycznych jako kluczowe w przyszłych latach. Istotne będzie wykorzystanie algorytmów sztucznej inteligencji w celu przewidywania zużycia oraz detekcji anomalii, jak również zastosowanie technologii przewodowej oraz bezprzewodowej transmisji danych telemetrycznych – szeregów czasowych MQTT (ang. *Message Queuing Telemetry Transport*) do zdalnego serwera oraz aplikacji webowej (WebSockets) z możliwością analizy zapisów historycznych z punktów pomiarowych lub urządzeń IoT i maszyn, a także odczytu parametrów w czasie rzeczywistym [13]. Istnieją także opublikowane badania, których efektem było opracowanie prototypu systemu monitorowania stanu źródła pojedynczego gazu w postaci czujnika ciśnienia montowanego bezpośrednio na butli z transmisją danych do systemu chmurowego, co również może wskazywać kierunek badań [2]. Przyszłe rozwiązania prawdopodobnie będą oferować zaawansowane możliwości zdalnego monitorowania i kontroli instalacji, a także źródeł gazów, zgodne z normami branżowymi oraz wymaganiami stawianymi urządzeniom współpracującym z wyrobami medycznymi [A1, A3].



Rys. 1. Przykład lokalnego systemu monitoringu stanu gazów medycznych (alarmy kliniczne) – opracowanie własne z użyciem generatora obrazów AI

Fig. 1. Example of a local medical gas monitoring system (clinical alarms) - created using an AI image generator

1.2. Perspektywy systemów monitorowania instalacji gazów medycznych

W najbliższej przyszłości kluczowe będzie opracowanie standardów umożliwiających bezproblemową integrację urządzeń różnych producentów, co przyczyni się do poprawy bezpieczeństwa i efektywności zarządzania instalacjami gazów medycznych w obiektach szpitalnych. Ze względu na znaczną liczbę niezunifikowanych rozwiązań i zamkniętych systemów monitorowania produkowanych przez różnych producentów – istotne będzie opracowanie standardu komunikacji lub jednolitego systemu centralnego nadzoru nad urządzeniami wchodzącymi w skład instalacji gazów medycznych, niekiedy rozlokowanych w dużych odległościach od siebie. Kluczowe może być zastosowanie rozwiązań komunikacji bezprzewodowej, jak LoRa (ang. *Long Range*), ZigBee lub sieci Mesh w celu transmisji danych oraz zastosowania centralnych systemów monitoringu instalacji bez konieczności modernizacji infrastruktury szpitalnej oraz budowy nowych połączeń przewodowych.

Kluczowe będą również systemy przechowujące dane historyczne oraz umożliwiające analizę danych historycznych oraz alarmów, również z wykorzystaniem AI. Istotnym aspektem rozwoju systemów monitoringu gazów medycznych będzie również zapewnienie bezpieczeństwa transmisji oraz przechowywania danych, ze względu na rosnące zagrożenia atakami hakierskimi na infrastrukturę krytyczną. Niezbędnymi elementami systemów będą zaawansowane mechanizmy ochrony danych i wykrywania anomalii, aby zapewnić ciągłość działania i bezpieczeństwo pacjentów [12–15].

2. Prototyp systemu centralnego

W pracy zaprezentowano aktualny stan badań w kontekście utworzenia pionierskiego centralnego systemu monitoringu instalacji gazów medycznych w realnej placówce medycznej, integrującego zarówno czujniki i urządzenia odpowiedzialne za alarmy kliniczne, jak i urządzenia wchodzące w skład źródeł gazów medycznych (m.in. sprężarki, stacje uzdatniania powietrza, agregaty próżniowe wraz z pompami). Najważniejsze z praktycznego punktu widzenia sygnały, komunikaty i alarmy eksploatacyjne generowane przez urządzenia wchodzące w skład prototypowej stacji sprężonego powietrza medycznego (wykonanej na podstawie jednej z opcji dopuszczalnej według standardu o ozn. A.9 – EN ISO 7396-1:2016) [A1] możliwe są do pogrupowania w zależności od typu urządzenia.

Sprężarki powietrza medycznego: status pracy sprężarki (np. włączona, wyłączona, w trybie gotowości, błąd), statystyki pracy, procentowe obciążenie sprężarki, priorytet w zespole urządzeń, względne i bezwzględne godziny pracy (całkowite i pod obciążeniem), maksymalny, minimalny i bieżący przepływ objętościowy, aktualne ciśnienie wyjściowe, ostrzeżenia i błędy sprężarki (alarmy eksploatacyjne).

Zespół uzdatniania sprężonego powietrza: status urządzenia (np. komunikaty o trybie pracy osuszacza, takie jak ADS (adsorpcja), REG (regeneracja), REP (napelnianie ciśnieniem), CHG (zmiana zbiornika), ECO (tryb ekonomiczny) i STB (tryb oczekiwania), alarmy punktu rosy w wytwarzanym powietrzu medycznym (informują o przekroczeniu ustawionej wartości granicznej punktu rosy), alarmy serwisowe i eksploatacyjne (alarmy filtrów, które sygnalizują nadmierne zanieczyszczenie wkładów filtracyjnych oraz konieczność ich wymiany w celu zachowania parametrów pracy, alarm przeciążenia osuszacza, który pojawia się, gdy ciśnienie różnicowe na filtrach wejściowym i końcowym jest zbyt wysokie), godziny pracy i czas do serwisu (informacje o czasie do następnego serwisu, prezentowane jako wartość procentowa).

Armatura instalacji: ciśnienie wyjściowe sprężonego powietrza medycznego (po redukcji ciśnienia), ciśnienie przed redukcją ciśnienia (w zbiornikach).

Agregat próżni medycznej: aktualny status pracy pomp próżniowych (P1–P4), liczba godzin pracy poszczególnych pomp, aktualne alarmy eksploatacyjne dla wszystkich pomp próżniowych, aktualna wartość podciśnienia próżni w instalacji (w zbiorniku).

Dodatkowe parametry: odczyt z niezależnych przetworników ciśnieniowych (4–20 mA) dla trzech gazów: sprężone powietrze medyczne, sprężone powietrze techniczne, próżnia (czujniki tensometryczne – EPI 8287), odczyt parametrów ze sterownika nadrzędnego sprężarek powietrza medycznego SmartAir Master firmy CompAir.

2.1. Założenia projektowe

Założeniem było opracowanie rozwiązania (centralnego systemu monitorowania i alarmowania) integrującego urządzenia różnych producentów, wchodzące w skład instalacji gazów medycznych szpitala zlokalizowanego w województwie małopolskim. System ten koncentruje się na monitorowaniu kluczowych elementów infrastruktury, takich jak stacja sprężonego powietrza medycznego, stacja pomp próżniowych oraz stacja sprężonego powietrza technicznego. Stworzenie scentralizowanego systemu monitoringu, wyposażonego w intuicyjny interfejs webowy stanowi pierwszy etap w kierunku implementacji kompleksowego rozwiązania chmurowego, umożliwiającego integrację rozproszonych urządzeń monitorujących na skalę krajową – w taki sposób aby centralizacja monitorowania nie odbywała się jedynie w obrębie jednego szpitala, a np. w obrębie określonego regionu kraju dla wielu obiektów leczniczych. Badania mają na celu znaczące usprawnienie zarządzania i nadzoru nad instalacjami gazów medycznych w placówkach ochrony zdrowia, co przyczyni się do zwiększenia bezpieczeństwa pacjentów i efektywności operacyjnej. Zastosowanie technologii chmurowych i zaawansowanych interfejsów użytkownika pozwoli na szybką analizę danych, wykrywanie anomalii, predykcję zużycia oraz podejmowanie natychmiastowych działań w przypadku awarii lub nieprawidłowości w funkcjonowaniu systemów. Opracowany prototyp stanowi fundamentalny krok w kierunku stworzenia kompleksowego, ogólnokrajowego systemu monitoringu instalacji gazów medycznych, co może znacząco przyczynić się do podniesienia standardów opieki zdrowotnej i bezpieczeństwa w placówkach medycznych.

2.2. Kluczowe innowacje i rozwiązania

Stworzony w pierwszym etapie prototyp umożliwia integrację urządzeń różnych producentów wykorzystując dostępne protokoły komunikacyjne (RS-485 MODBUS, TCP/IP) a także analogowe czujniki ciśnienia jako uzupełnienie systemu monitoringu. Dodatkową innowacją jest wykorzystanie infrastruktury chmurowej jako centrum danych, a także transmisji MQTT z wykorzystaniem brokera Mosquitto oraz bazy danych przystosowanej do gromadzenia znacznej ilości danych dotyczących kluczowych parametrów pracy urządzeń. Dodatkowo system zawierał lokalną instancję systemu monitoringu źródeł zasilania przeznaczoną dla personelu technicznego. Zdalny odczyt danych wykonany został do celów badawczych za pomocą routera (3G/4G) oraz standardowej komunikacji LTE jako rozwiązanie prototypowe.

2.3. Zakres aktualnego etapu badań

Zakresem systemu objęte były trzy stacje źródła zasilania gazów medycznych (sprężone powietrze medyczne, sprężone powietrze techniczne oraz próżnia medyczna) (rys. 3) zlokalizowane w placówce medycznej. System monitoringu dla tego zakresu został wdrożony w szpitalu i jest elementem badań oraz będzie rozbudowywany o kolejne funkcjonalności. Kolej-



Rys. 3. Ekran lokalny przeznaczony dla personelu technicznego – stanowisko badawcze – stacja powietrza medycznego – szpital w województwie małopolskim
Fig. 3. Local monitoring system intended for technical staff – research station of the medical air supply system - hospital in the Lesser Poland Voivodeship

nymi etapami jest rozbudowa systemu o dane ze strefowych czujników ciśnieniowych dla poszczególnych stref gazowych, a także integracja systemu ze źródłami gazów wyczerpalnych.

2.4. Architektura systemu

Wykonane rozwiązanie integruje urządzenia różnych producentów. Centralny system oparto na oprogramowaniu NodeRED wdrożonym na centralnym komputerze przemysłowym z zainstalowanym systemem operacyjnym Debian 11. Za pomocą oprogramowania NodeRED zrealizowano komunikację centrali z urządzeniami. Lokalne połączenia między urządzeniami w budynku szpitala wykonano za pomocą przewodowego połączenia w standardzie RS-485 (EIA-485) z protokołem komuni-

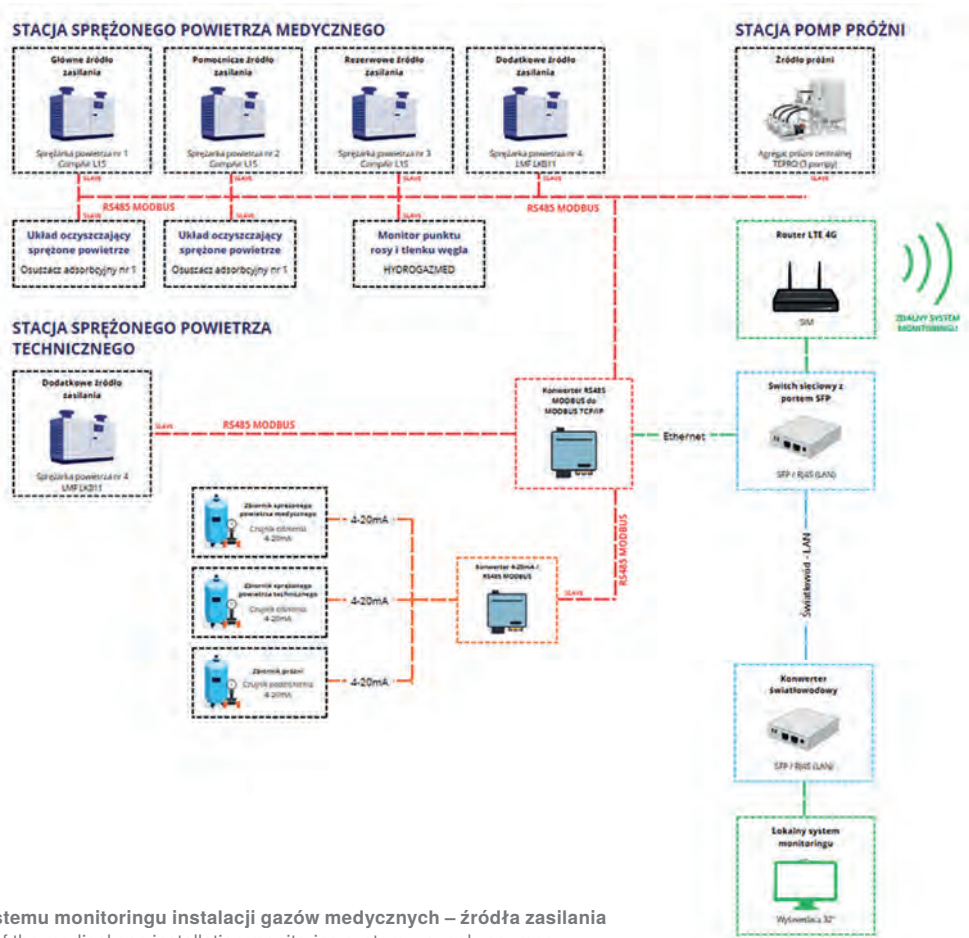
kacyjnym MODBUS. Analogowe czujniki ciśnienia połączono z całością systemu stosując konwerter sygnału 4–20 mA na RS-485 MODBUS. Przedstawiony system jest hybrydowym połączeniem zarówno komunikacji z wykorzystaniem szeregowej magistrali RS-485 z protokołem komunikacyjnym MODBUS, jak i sygnałów analogowych z czujników ciśnień dla instalacji gazów medycznych oraz połączenia światłowodowego i Ethernet wraz z routerem 3G/4G w celu udostępniania danych do infrastruktury chmurowej.

2.5. Budowa sieci oraz połączeń

Prototypowy system monitoringu źródeł zasilania gazów medycznych wykonany został z użyciem kilku technologii połączeń przewodowych oraz bezprzewodowych (rys. 4).

Magistrala szeregową RS-485: trzy sprężarki powietrza ComAir, model L15 z szeregowym interfejsem komunikacyjnym, sprężarka powietrza LMF, model LKB11 z szeregowym interfejsem komunikacyjnym, dwa urządzenia do uzdatniania powietrza – osuszacze adsorpcyjne Gardner Denver, typoszereg DPS, monitor zawartości tlenu węgla oraz punktu rosy, sterownik nadrzędny zarządzający trzema niezależnymi pompami próżniowymi TEPRO, model µAPC-100, dwie sprężarki powietrza LMF (model LKB11) wytwarzające powietrze do zastosowań technicznych, brama komunikacyjna Modbus RTU → Modbus TCP/IP Waveshare, model RS-485 TO ETH.

Sieć LAN: zarządzalny switch sieciowy Mikrotik (model RB260GS z wejściem SFP), brama komunikacyjna Modbus RTU → Modbus TCP/IP Waveshare (model RS-485 TO ETH), router TP-Link 3G/4G LTE z kartą SIM do komunikacji z infrastrukturą chmurową, konwerter światłowodowy CBF, SFP →RJ45, bezwentylatorowy komputer przemysłowy PC (Intel i5-8250U, 8 GB RAM DDR4, przystosowany do pracy ciągłej 24/7, z systemem operacyjnym Debian 11).



Rys. 4. Budowa systemu monitoringu instalacji gazów medycznych – źródła zasilania
Fig. 4. Architecture of the medical gas installation monitoring system – supply sources



Rys. 5. Wyświetlacz prezentujący odczyty z systemu monitoringu instalacji gazów medycznych
Fig. 5. Display presenting readings from the medical gas installation monitoring system

W opracowanym prototypie niezbędna była realizacja lokalnego systemu monitoringu źródeł zasilania z funkcją podglądu „na żywo” w dyspozytorni placówki medycznej. Do komputera przemysłowego został podłączony wyświetlacz 32” (rys. 5) przeznaczony do pracy ciąglej, umieszczony w centralnej dyspozytorni oddalonej od maszynowni o ponad 150 m. W celu integracji bramy komunikacyjnej Modbus RTU → Modbus TCP/IP z centralnym komputerem PC wykonano połączenie światłowodowe, stosując patchcord światłowodowy o długości 150 m, umieszczony w ciągach kablowych placówki medycznej – SC/PC – SC/PC SM simplex G.657A2.

2.6. Oprogramowanie i zasada działania

Podstawową funkcjonalnością systemu jest cykliczne zbieranie danych z urządzeń podłączonych do magistrali szeregowej RS-485 oraz informowanie o alarmach i zapis danych. Urządzeniem pełniącym funkcję *Master* w magistrali szeregowej jest komputer PC z systemem operacyjnym Debian 11 oraz oprogramowaniem NodeRED z biblioteką *node-red-dashboard*. Oprogramowanie wykorzystując funkcje protokołu Modbus RTU zawarte w ramce zapytania do urządzeń *Slave* w celu odczytu bieżących parametrów pracy urządzeń. Odczytane dane są przekazywane do części *front-end* aplikacji webowej – wizualizacji parametrów pracy. W prototypie rozbudowano oryginalne elementy dashboard o funkcjonalność generowania dźwięków o modulacji określonej normą EN ISO 7396-1:2016 [A1] w przypadku alarmu eksploatacyjnego, a także dostosowano kolorystykę alarmów oraz informacji do wymagań normy (rys. 6). Ponadto dane na cele późniejszej rozbudowy systemu są przekazywane do infrastruktury chmurowej oraz możliwe do odczytu z wykorzystaniem aplikacji webowej.

2.7. Zapis danych w chmurze

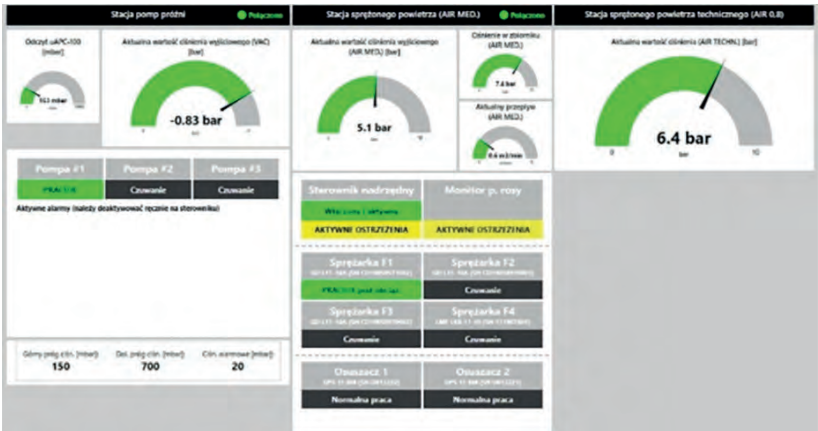
Podstawowe dane, które są kluczowe z perspektywy niniejszej pracy, obejmują aktualne odczyty parametrów czujników oraz

stan alarmów urządzeń wchodzących w skład systemu. Istotnym aspektem jest również częstotliwość odświeżania danych (wysyłka danych przez system do brokera), która powinna być odpowiednio dostosowana do potrzeb placówki medycznej. Po przeprowadzonych testach i symulacjach kosztów zastosowanych rozwiązań, przyjęto dla celów prototypowych odstęp czasowy wysyłki danych przez mikrokontroler na poziomie 15 sekund.

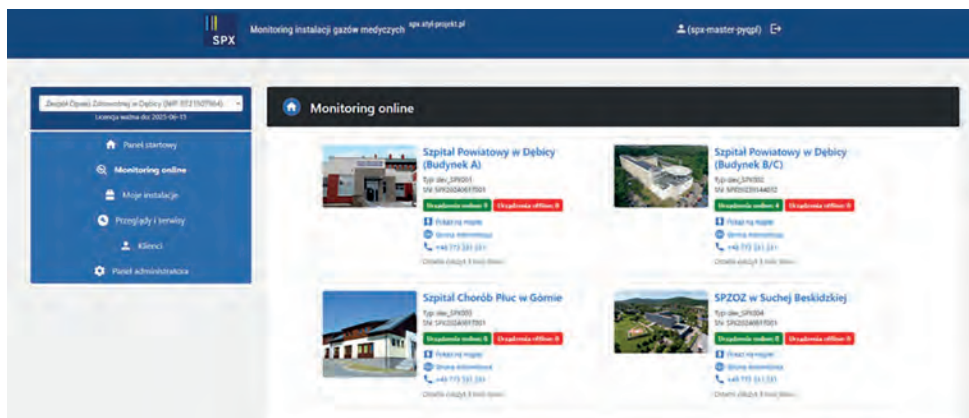
W kontekście założonego celu utworzenia rozproszonej sieci systemów monitorowania w różnych placówkach medycznych komunikujących się z jednym centralnym brokerem oraz jednym systemem obsługi bazy danych, częstotliwość oraz wielkość zapisu danych mają kluczowe znaczenie. Równie ważnym aspektem jest odpowiedni dobór typu bazy danych. Pierwszy etap wykonania zawierał utworzenie uniwersalnego zaplecza serwerowego w chmurze, umożliwiającego niezależne tworzenie aplikacji webowych lub mobilnych korzystających z kolekcjonowanych danych. Ze względu na charakterystykę zbieranych danych (duża ilość danych liczbowych – szeregi czasowe), po analizie literaturowej wybrano bazę danych typu NoSQL dedykowaną do przechowywania dużej ilości danych telemetrycznych – szeregów czasowych. Wybór ten był również podyktowany dostępnością usługi *SaaS InfluxDB Cloud* w infrastrukturze chmurowej Azure, co eliminuje konieczność obciążania maszyny wirtualnej – brokera MQTT. Jednym z kluczowych elementów systemu InfluxDB jest silnik bazy danych, oferujący funkcje typu agregacja i indeksowanie danych, co umożliwia szybkie i efektywne wykonywanie złożonych zapytań analitycznych. InfluxDB wspiera zblizony do SQL język zapytań InfluxQL, co ułatwia tworzenie skomplikowanych zapytań do analizy danych czasowych. Głównym powodem wyboru bazy danych InfluxDB jest jej duża wydajność. Istnieje również możliwość skalowania bazy danych przez zastosowanie konfiguracji klastrowych, które zapewniają redundancję oraz zwiększoną wydajność i dostępność, pozwalając na kontynuację operacji nawet przy awarii jednego z węzłów, co jest istotne w prowadzonym kierunku badań.

2.7.1. Wdrożenie instancji InfluxDB w chmurze Azure

W prototypie wdrożono instancję serwera bazy danych w modelu SaaS (ang. *Software as a Service*), wykorzystując możliwości rozwiązań chmurowych Microsoft Azure. W tym celu skonfigurowano początkowe parametry bezpośrednio w panelu Azure. Takie podejście pozwoliło zminimalizować ryzyko związane z błędną konfiguracją maszyny wirtualnej oraz błędami wynikającymi z czynnika ludzkiego (zarządzanie serwerem), a także umożliwiło przyszłościowe, szybkie skalowanie rozwiązania w odpowiedzi na rosnącą liczbę zapytań lub zapisów w miarę rozwoju systemu. Aby przechowywać dane związane z systemem monitoringu, utworzono *bucket* (lokalizację umożliwiającą gromadzenie serii danych – odpowiednik bazy

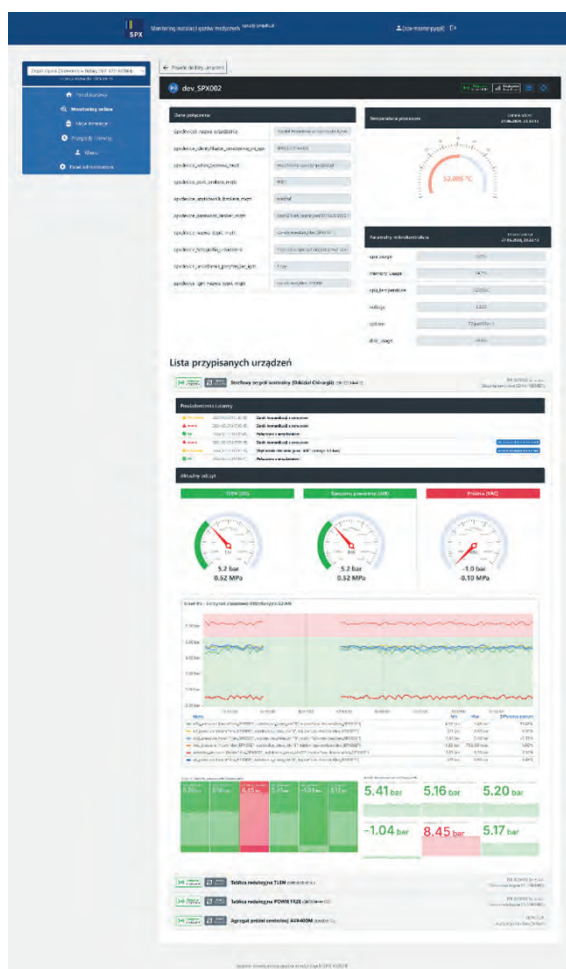


Rys. 6. Lokalny dashboard umożliwiający stały nadzór nad źródłami gazów medycznych
Fig. 6. Local dashboard enabling continuous supervision over medical gas sources



Rys. 7. Widok aplikacji użytkownika

Fig. 7. User application view



Rys. 8. Zrzut ekranu z aplikacji webowej – widok pojedynczego szpitala (dostęp zdalny)

Fig. 8. Screenshot from the web application - view of a single hospital (remote access)

danych), gdzie będą przechowywane dane dotyczące alarmów i poziomów ciśnień z odpowiednimi indeksami.

2.7.2. Aplikacja webowa GUI

Kluczowym i najważniejszym z perspektywy użytkownika elementem jest aplikacja webowa, w której zebrane dane będą przedstawiane w czytelny sposób. Na potrzeby prototypu aplikacja webowa została stworzona przy użyciu funkcji oferowanych przez system zarządzania treścią (CMS) WordPress. Stworzono własny motyw za pomocą funkcji dynamicznego

zarządzania treścią, dostępem, użytkownikami oraz uprawnieniami użytkowników do poszczególnych treści. Panel administracyjny umożliwia łatwe zarządzanie treścią, np. urzędzeniami czy szczegółami instalacji, bez konieczności edytowania statycznej strony internetowej (kodu HTML). Zastosowanie języka PHP umożliwiło przetwarzanie funkcji po stronie serwera. Widoki i funkcjonalności dla standardowego użytkownika. Utworzono widoki panelu administracyjnego z kilkoma sekcjami.

Panel startowy – miejsce, gdzie użytkownik systemu rozpoczyna swoją pracę. Zawiera najważniejsze informacje o systemie, ostatnie powiadomienia oraz informacje na temat licencji i instytucji, do której przypisany jest użytkownik.

Monitoring online – główna sekcja aplikacji webowej. Tutaj znajduje się lista niezależnych systemów monitoringu przypisanych do użytkownika (rys. 7). W kolejnych etapach badań znajdą się tam poszczególne placówki medyczne. Lista systemów monitorowania to zestawienie szpitali powiązanych z danym kontem, które zostały przypisane użytkownikowi przez administratora systemu. Po wyborze systemu, użytkownik ma podgląd parametrów połączenia, aktualnego statusu połączenia z brokerem MQTT oraz ostatnich alarmów i odczytów związanych z daną instalacją (rys. 8).

2.7.3. Transmisja danych do środowiska chmurowego

Urządzenia zostały fizycznie zintegrowane w jedną sieć magistrali RS-485 za pomocą przewodu. Dane z urządzeń peryferyjnych są odczytywane za pomocą skryptu NodeRED, jednocześnie prezentując je na lokalnym interfejsie. Zgromadzone dane są przekazywane do brokera MQTT w chmurze (Mosquitto) w regularnych odstępach czasu. Do zapisu danych w bazie InfluxDB użyto protokołu MQTT oraz agenta zbierania danych InfluxDB o nazwie Telegraf. Odczyt danych on-line w interfejsie webowym realizuje transmisja za pomocą WebSockets.

3. Podsumowanie i wnioski

Opracowany i zaimplementowany prototyp systemu monitoringu instalacji gazów medycznych, ze szczególnym uwzględnieniem źródeł gazów medycznych i próżni w placówce medycznej w województwie małopolskim, oparto na integracji urządzeń różnych producentów, wykorzystując protokoły komunikacyjne RS-485 MODBUS, TCP/IP oraz analogowe czujniki ciśnienia, a także nowoczesne technologie chmurowe, w tym transmisję MQTT i bazę danych typu NoSQL (InfluxDB) do przechowywania szeregów czasowych stanowi pierwszy etap badań nad kompleksowym, ogólnokrajowym systemem monitoringu

instalacji gazów medycznych. Dalszy rozwój będzie polegał na stworzeniu monitoringu strefowego i integracji z innymi źródłami gazów oraz szpitalami w regionie, co przyczyni się do podniesienia standardów opieki zdrowotnej i bezpieczeństwa w szpitalach. Dane uzyskane z prototypowych systemów monitorowania zostaną wykorzystane do testowania i wdrożenia algorytmów sztucznej inteligencji, tym samym do predykcji zużycia gazów medycznych oraz detekcji anomalii w całym systemie rurociągowym. Nowością w bieżących badaniach jest integracja różnych urządzeń, wykorzystanie infrastruktury chmurowej, zaawansowany webowy interfejs oraz lokalne centrum alarmowania dla personelu technicznego w połączeniu z rozpoczęciem prac przygotowawczych do utworzenia środowiska wykorzystującego dane telemetryczne do uczenia algorytmów sztucznej inteligencji.

Bibliografia

1. Malein W., Beecroft C., *Medical gases*, "Anaesthesia & Intensive Care Medicine", Vol. 22, No. 12, 2021, 769–773, DOI: 10.1016/j.mpaic.2021.10.010.
2. Koca Y.B., *Control and Monitoring Systems for Hospital Medical Gases*, [In:] 8th International Artificial Intelligence and Data Processing Symposium (IDAP), 2024, DOI: 10.1109/IDAP64064.2024.10710782.
3. Aref M.H., Shaarawi A.M., Badr M.T., *Centralized Medical Gas Monitoring Solution For Medical Piping Gases In The Hospitals*, "Journal of Multidisciplinary Engineering Science and Technology", Vol. 4, No. 8, 2017, 7824–7828.
4. Soni N., Maheshwari D.G., *Overview of regulatory requirements for medical gases and pharmaceutical gases*, "International Journal of Research in Pharmacy and Pharmaceutical Sciences", Vol. 2, No. 6, 2017, 61–64.
5. Lakshmi N., Vasantha G., Sushma L., Naidu M., Vishnu V., Wesly E., Nataraj K., Raju K.V., *An Overview of Regulatory Guidelines for Medical Gases*, "Asian Journal of Pharmaceutics", Vol. 17, No. 3, 2023, 355–366, DOI: 10.22377/ajp.v17i03.4974.
6. Sarangi S., Babbar S., Taneja D., *Safety of the medical gas pipeline system*, "Journal of Anaesthesiology, Clinical Pharmacology", Vol. 34, No. 1, 2018, 99–102, DOI: 10.4103/joacp.JOACP_274_16.
7. Petty W.C., *AANA journal course: update for nurse anesthetists – medical gases, hospital pipelines, and medical gas cylinders: how safe are they?*, "AANA Journal", Vol. 63, No. 4, 1995, 307–324.
8. Siddharth V., Jamwal T., Khare A., Khanna P., Madaan N., Sharma D.K., *Third-party audit of Medical Gas Pipeline System (MGPS) in healthcare facilities: An important tool for quality improvement in provisioning of medical gas services*, "Indian Journal of Anaesthesia", Vol. 69, No. 7, 2025, 718–721, DOI: 10.4103/ija.ija_1255_24.
9. Varpio L., Kuziemy C., MacDonald C., King W.J., *The Helpful or Hindering Effects of In-Hospital Patient Monitor Alarms on Nurses*, "CIN: Computers, Informatics, Nursing", Vol. 30, No. 4, 2012, 210–217, DOI: 10.1097/ncn.0b013e31823eb581.
10. Schmid F., Goepfert M.S., Franz F., Laule D., Reiter B., Goetz A.E., Reuter D.A., *Reduction of clinically irrelevant alarms in patient monitoring by adaptive time delays*, "Journal of Clinical Monitoring and Computing", Vol. 31, No. 1, 2015, 213–219, DOI: 10.1007/s10877-015-9808-2.
11. Gómez-Chaparro M., García-Sanz-Calcedo J., Armenta Márquez L., *Analytical Determination of Medical Gases Consumption and Their Impact on Hospital Sustainability*, "Sustainability", Vol. 10, No. 8, 2018, DOI:10.3390/su10082948.
12. Wijaya N.H., Nurokhim, Untara B., *Centralization of Medical Gas Pressure Monitoring Based on ATMega328*, 1st International Conference on Information Technology, Advanced Mechanical and Electrical Engineering (ICITAMEE), Yogyakarta, Indonesia: IEEE, 2020, 204–208, DOI: 10.1109/ICITAMEE50454.2020.9398487.
13. Mahapatra C., *Integration of IoT into medical gas monitoring management systems contributes to enhancing safety and operational efficiency*, "Medical Gas Research", Vol. 15, No. 2, 2025, 216–217, DOI: 10.4103/mgr.MEDGASRES-D-24-00132.
14. Nugraha N.A.B., Mashoedah, *Oxygen Availability Control and Monitoring System in Hospitals using IoT*, "Journal of Physics: Conference Series", Vol. 2111, 2021, DOI: 10.1088/1742-6596/2111/1/012016.
15. Yugapriya M., Kovilpillai J.J.A., Jayanthi S., *Medical Gas Pressure Level Monitoring System using Machine Learning Algorithms*, International Conference on Sustainable Computing and Smart Systems (ICSCSS), Coimbatore, India: IEEE, 2023, 207–214, DOI: 10.1109/ICSCSS57650.2023.10169503.

Inne źródła

- A1. ISO 7396-1:2016 *Medical gas pipeline systems*, Part 1: Pipeline systems for compressed medical gases and vacuum.
- A2. ISO 4126-1:2013 *Safety devices for protection against excessive pressure*, Part 1: Safety valves.
- A3. Rozporządzenie Parlamentu Europejskiego i Rady (UE) 2017/745 z dnia 5 kwietnia 2017 r. w sprawie wyrobów medycznych, zmiany dyrektywy 2001/83/WE, rozporządzenia (WE) nr 178/2002 i rozporządzenia (WE) nr 1223/2009 oraz uchylenia dyrektyw Rady 90/385/EWG i 93/42/EWG.

An Innovative Prototype of a Central Monitoring System for Medical Gas Supply Sources

Abstract: The article presents the assumptions of the project and the implementation of a monitoring system for medical gas installations, with particular emphasis on their source systems. The system focuses on monitoring key elements of the infrastructure, such as medical and technical compressed air stations and vacuum pump stations. The primary objective was to develop a centralized monitoring system with an intuitive user interface, constituting the first stage toward the implementation of a comprehensive nationwide cloud-based solution, as well as the collection of data for future use in training predictive AI algorithms. The developed prototype integrates devices from multiple manufacturers, utilizing RS-485 MODBUS communication protocols and analog pressure sensors. The system employs cloud infrastructure as a data center, MQTT-based data transmission, and a database designed for the storage of large volumes of time-series data. The implemented prototype enables rapid data analysis, continuous monitoring, alerting, and immediate response in the event of system failures. It represents a fundamental step toward the creation of a nationwide monitoring system for medical gas installations, which may significantly contribute to improving healthcare standards and safety in hospital facilities.

Keywords: medical gases, medical gas alarms, monitoring systems, IoT, medical gas pipelines systems, medical gas monitoring system, smart hospital, hospital IoT

mgr inż. Jakub Michalik

jmicalik@agh.edu.pl
ORCID: 0009-0003-4624-8538

Doktorant w dyscyplinie informatyka techniczna i telekomunikacja na Wydziale Inżynierii Metali i Informatyki Przemysłowej Akademii Górniczo-Hutniczej im. Stanisława Staszica w Krakowie. Absolwent kierunków: Edukacja Techniczno-Informatyczna oraz Informatyka Techniczna na Wydziale Inżynierii Metali i Informatyki Przemysłowej AGH, a także Informatyka w Wyższej Szkole Zarządzania i Bankowości w Krakowie. Full Stack Developer oraz specjalista łączący obszary IT, inżynierii i wyrobów medycznych. Zajmuje się wdrażaniem aplikacji webowych, rozwiązań IIoT oraz dedykowanego oprogramowania. Jego zainteresowania badawcze koncentrują się na systemach Smart-Hospital, Przemysłu 4.0, IIoT oraz badaniach nad niszczącymi metodami detekcji nieszczelności rurociągów gazowych. W ramach pracy doktorskiej zajmuje się opracowaniem innowacyjnego systemu monitorowania instalacji gazów medycznych, wykorzystującego fuzję danych multimodalnych. Zawodowo zajmuje się zagadnieniami związanymi z wyrobami medycznymi (systemy rurociągowe do gazów medycznych), w szczególności w kontekście wymagań Rozporządzenia Parlamentu Europejskiego i Rady (UE) 2017/745 (MDR). Autor i współautor publikacji konferencyjnych z zakresu systemów monitorowania, technologii Przemysłu 4.0 oraz zastosowań materiałów przeciwdrobnoustrojowych.



dr hab. inż. Marcin Hojny, prof. AGH

mhojny@agh.edu.pl
ORCID: 0000-0002-5973-758X

Pracownik naukowo-dydaktyczny, Akademia Górniczo-Hutnicza w Krakowie, Wydział Inżynierii Metali i Informatyki Przemysłowej, Katedra Informatyki Stosowanej i Modelowania. Zainteresowania naukowe koncentrują się przede wszystkim na inżynierii obliczeniowej, obejmującej m.in. rozwój nowych metod obliczeniowych oraz projektowanie autorskich systemów symulacyjnych, a także na projektowaniu i implementacji systemów cyberfizycznych wykorzystujących technologie Przemysłu 4.0/5.0. Dorobek naukowy obejmuje 75 publikacji, w tym 30 artykułów indeksowanych w bazie Journal Citation Reports (JCR), oraz trzy monografie naukowe. Aktywnie uczestniczył w realizacji ponad 26 projektów badawczo-rozwojowych (B+R), z których osiem zakończyło się wdrożeniem opracowanych rozwiązań do przemysłu.

