



Moduł czujników wielu gazów zagrożeń chemicznych

JAROSŁAW MŁYŃCZAK¹, KRZYSZTOF KOPCZYŃSKI¹,
MIROŚLAW MAZIEJUK², JADWIGA MIERCZYK¹

¹Wojskowa Akademia Techniczna, Instytut Optoelektroniki, 00-908 Warszawa,
ul. gen. S. Kaliskiego 2, jmlynczak@wat.edu.pl, kkopczyński@wat.edu.pl

²Wojskowy Instytut Chemii i Radiometrii, 00-910 Warszawa,
al. gen. Antoniego Chruściela „Montera” 105, m.maziejuk@wichir.waw.pl

Streszczenie. W artykule przedstawiono opis budowy oraz badania modułu czujników wielu gazów substancji chemicznych. Moduł jest w stanie wykrywać 11 różnych substancji w stanie gazowym jednocześnie i liczba ta może zostać zwiększona w miarę potrzeb. Moduł został zaprojektowany i zbudowany jako urządzenie do zainstalowania na mobilnych platformach bezzałogowych w zastosowaniach antykrzysowych.

Słowa kluczowe: skażenia chemiczne, czujnik chemiczny, czujnik elektrochemiczny, czujnik optyczny
DOI: 10.5604/12345865.1131335

1. Wstęp

Nowoczesne technologie cyfrowe i teleinformatyczne oraz istniejące urządzenia przetwarzania, przesyłania i magazynowania danych pozwalają na monitorowanie, sondowanie i rozpoznawanie środowiska, wspomagając działania na rzecz szeroko pojętego bezpieczeństwa. Szczególną rolę we współczesnych systemach informacyjnych zaczynają odgrywać autonomiczne platformy bezzałogowe, których operacyjność uzależniona jest od dostępnych zestawów różnego typu modułów sensorowych. Głównym zadaniem platform bezzałogowych jest analiza środowiska i wykrywanie zagrożeń [1-4]. Przy zastosowaniu czujników typu „in-situ” [5-10] analiza dotyczy bezpośredniej bliskości platformy i jej kilkumetrowego otoczenia, a zastosowanie systemów detekcyjnych typu „stand-off” [11-17] pozwala na analizę zagrożeń na odległościach do kilkudziesięciu metrów.

Skażenia chemiczne należą do podstawowych zagrożeń związanych z rozwojem cywilizacji. Do ich wykrywania służą różnego rodzaju czujniki chemiczne [18-20]. Najpowszechniej stosowanym, a zarazem najtańszym rozwiązaniem są czujniki elektrochemiczne [21-24]. W wyniku reakcji elektrolitu z wykrywaną substancją generują one sygnał elektryczny zależny od stężenia badanego związku. Obecnie są dostępne na rynku tego typu urządzenia umożliwiające detekcję do 5 gazów jednocześnie [25]. Innym rodzajem czujników są czujniki optyczne wykorzystujące zjawisko absorpcji promieniowania podczerwonego przez wykrywaną substancję [26, 27]. Tego typu urządzenia są również dostępne na rynku [25] i z reguły służą do wykrywania tylko jednego rodzaju substancji. Używając przestrajalnego interferometru Fabry'ego-Pérotta można taki czujnik wykorzystać do detekcji wielu substancji [28-31]. Systemy do monitoringu bezpieczeństwa muszą mieć budowę modułową, pozwalającą na właściwe konfigurowanie zestawu sensorów dedykowane konkretnym zastosowaniom i koniecznej liczbie wykrywanych substancji. W ramach projektu „Zintegrowany mobilny system wspomagający działania antyterrorystyczne i antykryzysowe — PROTEUS” [32] podjęto pracę nad opracowaniem nowego systemu czujników chemicznych spełniającego wymagania taktyczno-techniczne opracowane przez Centrum Naukowo-Badawcze Ochrony Przeciwpożarowej (CNBOP). Zgodnie z tymi wymaganiami opracowany moduł czujników zagrożeń chemicznych miał się charakteryzować między innymi małą masą, małymi wymiarami oraz możliwością wykrywania co najmniej dziesięciu substancji chemicznych jednocześnie. Urządzenia takie nie występują na rynku, mimo że dotyczą wykrywania podstawowych substancji, z jakimi mogą mieć do czynienia służby podczas interwencji kryzysowych.

2. Wykrywane substancje

Wykrywane substancje, zakres oraz rozdzielczość detekcji opracowanego modułu czujników chemicznych zostały przedstawione w tabeli 1.

TABELA 1

Wykrywane substancje, zakres oraz rozdzielczość detekcji

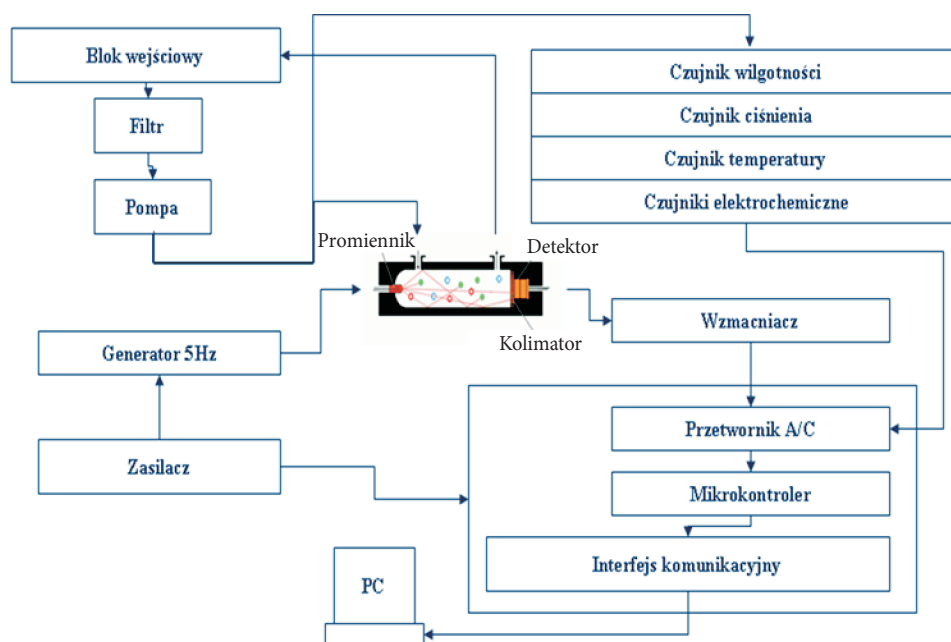
| Nazwa substancji niebezpiecznej | Zakres pomiarowy przyrządu [ppm] | Rozdz. przyrządu [ppm] |
|----------------------------------|----------------------------------|------------------------|
| Amoniak NH ₃ | 0-100 | 2 |
| Chlor Cl ₂ | 0-10 | 0,05 |
| Chlorowódór HCl | 0-30 | 0,7 |
| Fluorowódór HF | 0-10 | 0,1 |
| Dwutlenek siarki SO ₂ | 0-20 | 0,1 |

cd. tabeli 1

| | | |
|---|-------------|---------|
| Dwutlenek azotu NO ₂ | 0-50 | 0,1 |
| Tlenek azotu NO | 0-100 | 0,7 |
| Tlen O ₂ | 0-100% | 1% |
| Dwutlenek węgla CO ₂ | 0-100% | 0,1% |
| Tlenek węgla CO | 0-2000 | 0,1 |
| Gazy wybuchowe (metan i węglowodory) — IR | 0-100% | 1% |
| Temperatura | -30-+40 st. | 0,1 st. |
| Wilgotność względna | 0-100% | 0,1% |

3. Architektura modułu

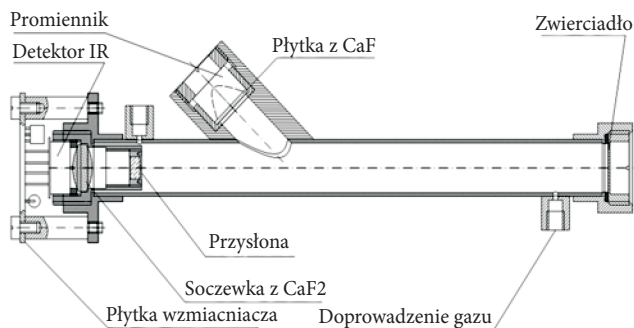
Moduł tworzy zespół czujników elektrochemicznych i czujnik optyczny do detekcji gazów oraz sensory temperatury i wilgotności służące do pomiaru podstawowych wielkości wpływających na wskazania czujników. Podzespoły te współpracują z układem elektronicznym wzmacniaczy i przetworników analogowo-cyfrowych połączonych z mikrokontrolerem odpowiedzialnym za sterowanie pomiarem i komunikację.



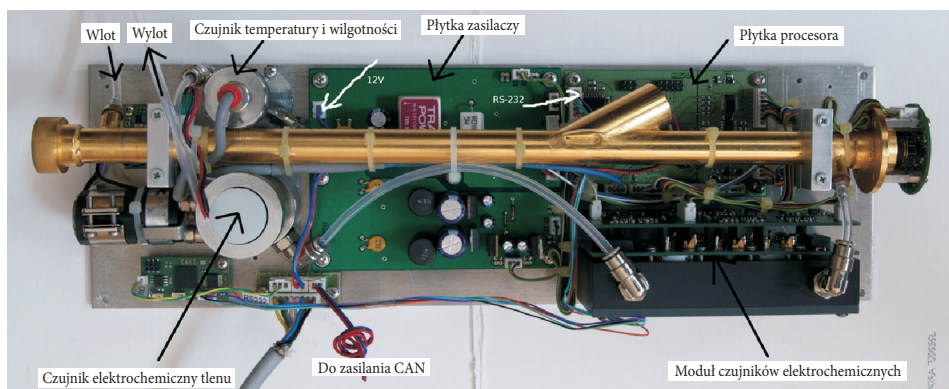
Rys. 1. Schemat blokowy modułu

Czujnik optyczny z przestrajalnym interferometrem Fabry'ego-Pérot'a posiada przepływową komorę pomiarową, w której zamontowano źródło promieniowania podczerwonego (IR) i odbiornik. Źródłem promieniowania podczerwonego jest promiennik termiczny, modulowany poprzez kluczowanie napięcia zasilającego. Do pomiaru promieniowania IR zastosowano detektor piroelektryczny, połączony z przestrajalnym filtrem optycznym w postaci interferometru Fabry'ego-Pérot'a. Opracowana konstrukcja umożliwi przestrajanie w zakresie optycznym 4-5 μm . Dzięki zastosowaniu interferometru liczba wykrywanych substancji może zostać rozszerzona o wszystkie substancje posiadające charakterystyczne pasma absorpcji w badanym paśmie promieniowania 4-5 μm .

Na rysunku 1 pokazano schemat blokowy modułu, a na rysunku 2 rysunek złożeniowy komory pomiarowej. Na rysunku 3 przedstawiono zdjęcie konstrukcji modułu.



Rys. 2. Rysunek złożeniowy komory pomiarowej



Rys. 3. Zdjęcie konstrukcji modułu

4. Konstrukcja modułu

Opracowany moduł czujników chemicznych posiada wymiary $400 \times 230 \times 110$ mm. Poszczególne zespoły modułu zostały zamontowane na płycie stalowej przykręconej do obudowy. Całość tworzą: czujnik optyczny, zespół czujników elektrochemicznych, pompa pobierająca gaz do analizy oraz zespół układów elektronicznych.

Układy elektroniczne modułu zostały podzielone na pięć bloków:

- Blok interfejsowy zapewniający komunikację w standardzie RS 232 oraz CAN OPEN.
- Blok zasilacza zawierający wejście 24 VDC oraz wyjścia napięć ± 5 V do zasilania układów analogowych, +5 V do zasilania układów cyfrowych i +12 V do zasilania pompy. Na płycie zasilacza znajdują się także klucze tranzystorowe do załączania nadajnika podczerwieni i pompy.
- Blok wzmacniacza sygnałów z detektora, w którym znajduje się wzmacniacz z filtrem (elektrycznym) pasmowo-przepustowym oraz wzmacniacz sterujący filtrem optycznym Fabry'ego-Pérot.
- Blok wzmacniaczy czujników elektrochemicznych zawierający układy potencjostaticzne i przetworniki prądu na napięcie.
- Blok mikrokontrolera z przetwornikami analogowo-cyfrowymi do czujników elektrochemicznych i pirodetektora oraz przetwornikiem cyfrowo-analogowym do sterowania filtrem Fabry'ego-Pérot.

Oprogramowanie mikrokontrolera dzieli się na oprogramowanie sterujące przebiegiem pomiaru i wysyłające dane do operatora oraz oprogramowanie odbierające i analizujące dane pomiarowe. Oprogramowanie mikrokontrolera po włączeniu zasilania wykonuje autodiagnostykę i przechodzi do wykonania pomiaru i wysłania danych.

Protokół komunikacyjny obejmuje wysyłanie do operatora w formacie tekstowym w ramach co 5-10 sekund danych zawierających rodzaj gazu i jego stężenie.

Interfejs zasilający i komunikacyjny modułu wykonano na bazie złącza militarnego serii MIL-38999 — 8D0-15W97SN (gniazdo) firmy SOURIAU. Komunikacja pomiędzy komputerem operatora a modułem realizowana jest w standardzie CAN OPEN.

5. Działanie modułu

Moduł zasilany jest napięciem stałym o wartości 24 VDC, pobiera prąd 0,3 A, a zatem moc pobierana przez czujnik wynosi 7,2 W.

Po włączeniu zasilania moduł samoistnie przechodzi w stan pracy przesyłania danych do operatora poprzez interfejs komunikacyjny. Nie wymaga żadnych dodatkowych komend od operatora, co zmniejsza obciążenie złącza komunikacyjnego oraz ułatwia obsługę.

W sytuacji przerywania połączenia komunikacyjnego modułu z komputerem operatora odbiór danych zostaje zatrzymany. Po ponownym podłączeniu następuje samoczynna kontynuacja odbioru danych z modułu, bez konieczności zmian w konfiguracji oprogramowania lub ponownego łączenia programowego. Przerwanie połączenia transmisji danych w trakcie pracy modułu nie wpływa na jego pracę.

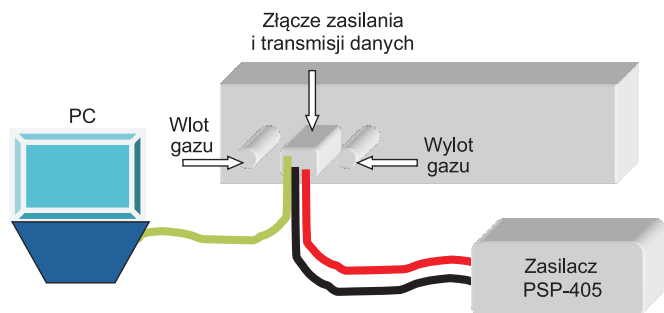
Przerwanie zasilania modułu powoduje jego natychmiastowe wyłączenie i przerywanie przesyłania danych. Po włączeniu zasilania moduł zaczyna ponownie przysyłać dane, które ponownie są odbierane przez komputer operatora i wyświetlane na ekranie. Przerwanie zasilania w trakcie przesyłania danych nie wymusza konieczności zmian lub ponownej konfiguracji oprogramowania odczytującego dane.

Moduł wymaga odpowiedniego czasu do ustabilizowania temperatury sensorów. Do osiągnięcia stabilnych warunków pracy (dokładność ok. 2-3%) czujnik potrzebuje ok. 10 minut na stabilizację.

Moduł może pracować w sposób ciągły bez ograniczeń czasowych. Za jedyne ograniczenie uznać należy zużywanie się sond elektrochemicznych w czasie eksploatacji. Powinny one podlegać wymianie co 1-2 lata. Ponadto zużywanie się sond elektrochemicznych wpływa na poziom zerowy wskazań (w odstępie kilku miesięcy różnica wskazań waha się w zakresie 2-3%).

6. Badania efektywności pomiaru substancji chemicznych oraz temperatury i wilgotności

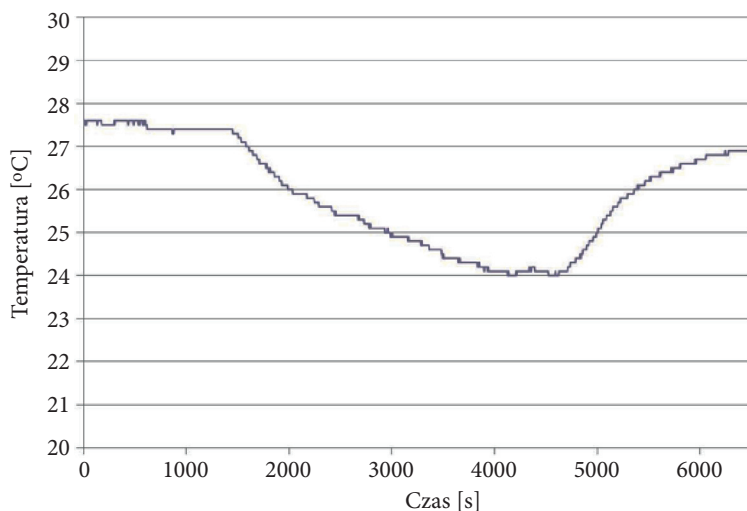
Badania efektywności pomiaru temperatury i wilgotności przeprowadzono w układzie przedstawionym na rysunku 4.



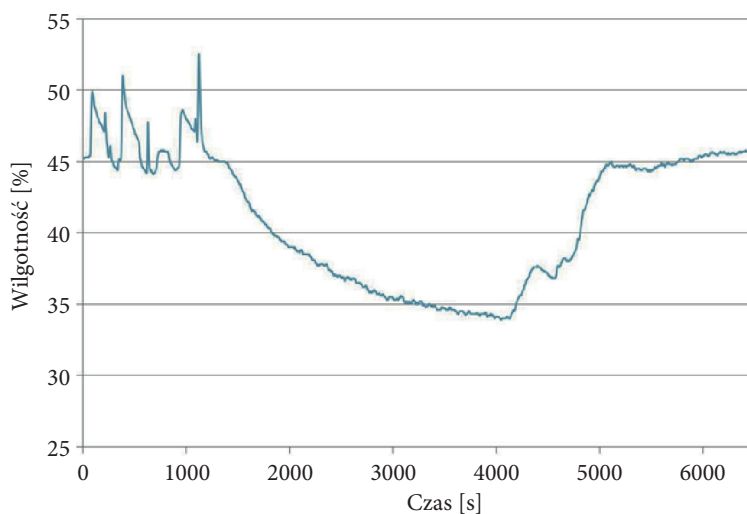
Rys. 4. Schemat układu pomiarowego do badania efektywności pomiaru temperatury i wilgotności

Moduł umieszczono w zamkniętym pomieszczeniu o regulowanej temperaturze i wilgotności. Badania przeprowadzono w zakresie temperatury 20-30 st. z rozdzielczością 0,1 st. oraz wilgotności w zakresie 30-55% z rozdzielczością 0,1%.

Wyniki pomiaru przedstawiono na rysunkach 5 i 6 odpowiednio dla temperatury i wilgotności. Pojawiające się piki na początku pomiaru wilgotności są związane z wprowadzaniem do modułu mieszaniny gazów wykorzystywanych do testów pomiaru substancji chemicznych.

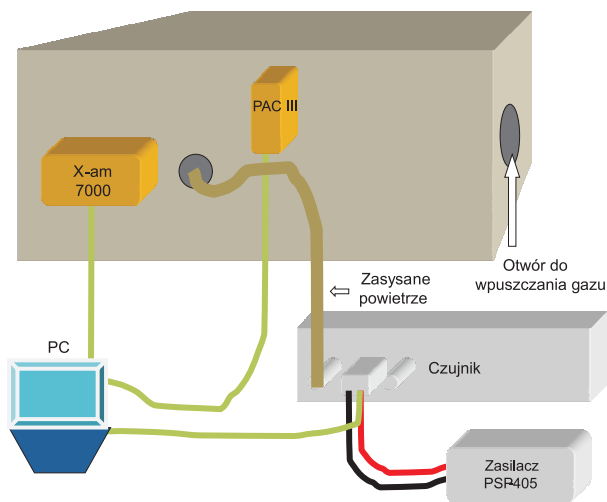


Rys. 5. Rejestrowane zmiany temperatury w czasie



Rys. 6. Rejestrowane zmiany wilgotności w czasie

Badania efektywności pomiaru różnych substancji chemicznych w formie gazowej przeprowadzono w układzie przedstawionym na rysunku 7.

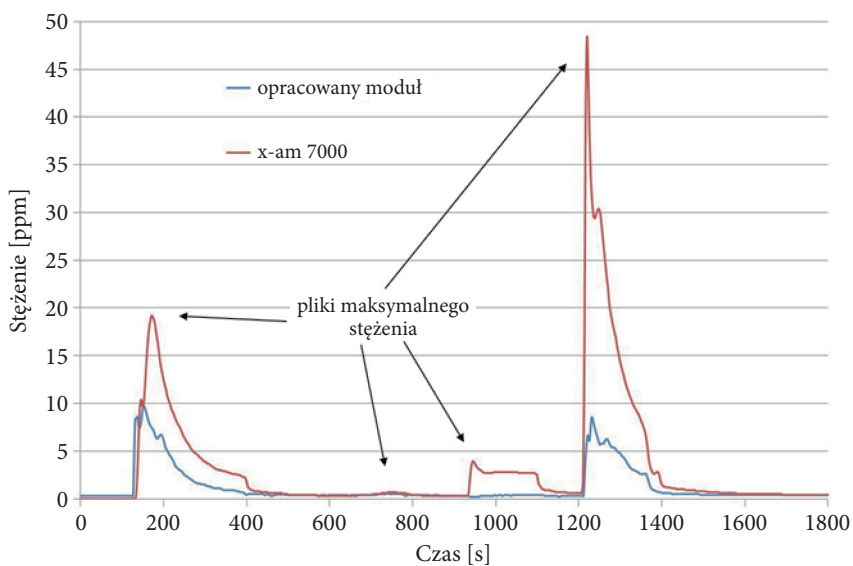
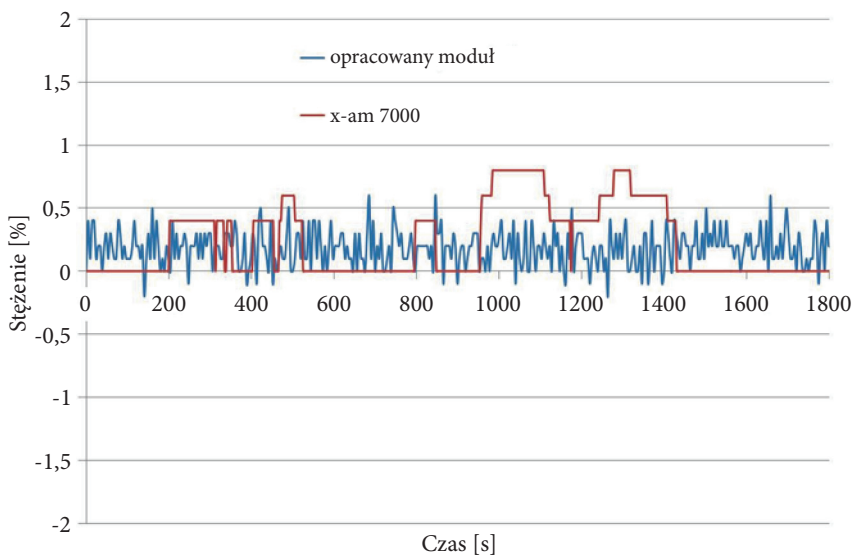


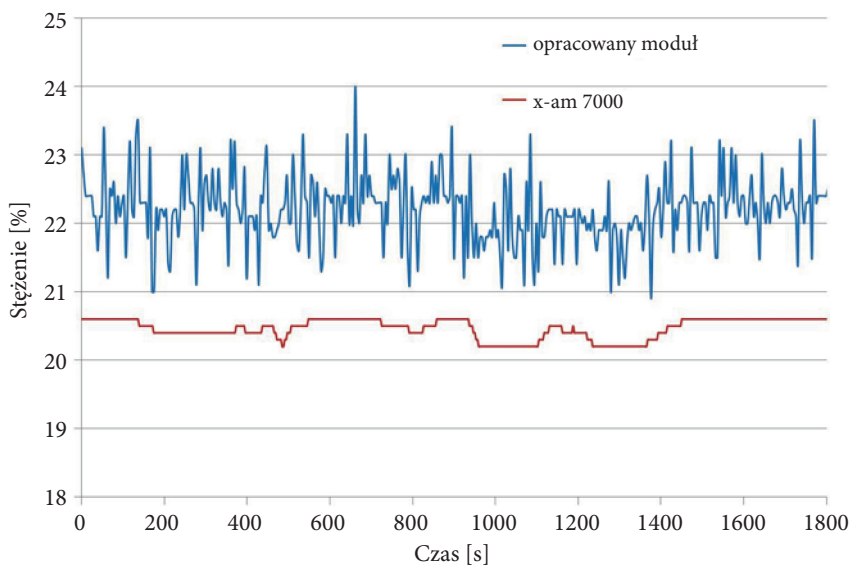
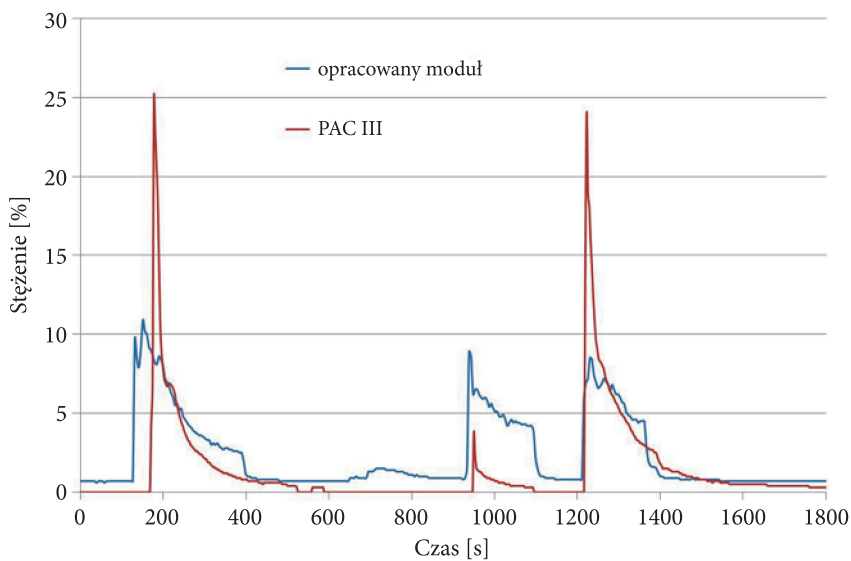
Rys. 7. Układ pomiarowy do badań efektywności pomiaru różnych substancji chemicznych

W celu zapewnienia odpowiedniego stężenia opracowano i wykonano specjalną komorę o wymiarach $20 \times 22 \times 28$ cm. Do jej wnętrza przez specjalny otwór wpuszczano badane substancje. Wewnątrz komory umieszczono czujniki PAC III oraz x-am 7000 firmy Dräger, które służyły jako czujniki referencyjne. Czujniki PAC III oraz x-am 7000 umieszczone były w stacjach dokujących i wysyłały dane pomiarowe do komputera poprzez port RS-232. Badany moduł znajdował się na zewnątrz komory. Testowany gaz pobierany był do modułu przez specjalną rurkę zasysającą badane powietrze. Dane z modułu przesyłane były poprzez interfejs komunikacyjny do komputera. Dzięki takiej konfiguracji układu pomiarowego na jednym ekranie komputera można było obserwować wyniki pomiarów ze wszystkich czujników jednocześnie i w czasie rzeczywistym.

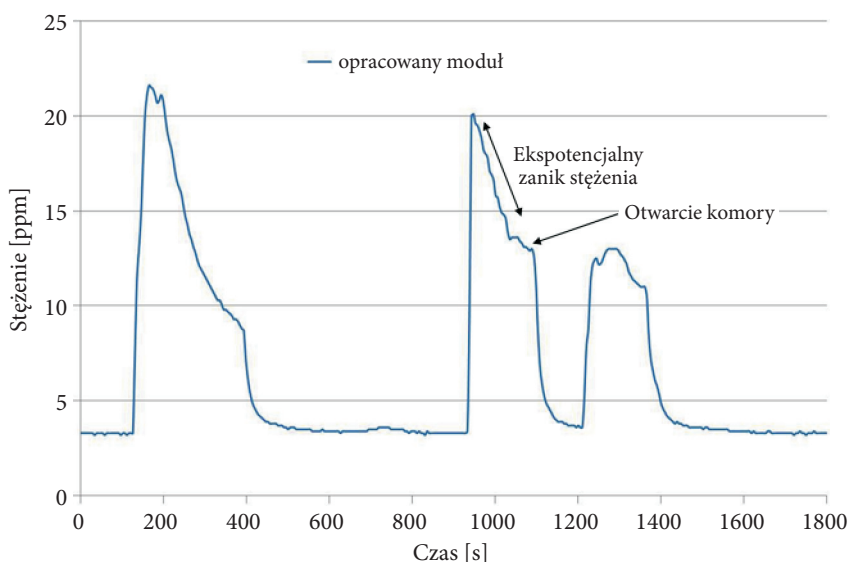
Przeprowadzono badania następujących substancji: SO_2 , CO_2 , O_2 , HCl , NO i NH_3 . Na rysunkach 8-13 pokazano otrzymane wyniki pomiarów gazów. Wyniki dla opracowanego modułu przedstawiono na jednym wykresie z wynikami dla czujników x-am 7000 oraz PAC III jako czujników referencyjnych. Dla NO i NH_3 nie pokazano danych referencyjnych ze względu na brak takich sond w czujnikach referencyjnych. Mieszanina badanych substancji o różnym stężeniu była wpuszczana do komory czterokrotnie, co widać poprzez występowanie czterech pików (rys. 8).

Przedstawione wyniki wymagają pewnego komentarza i analizy. Z wykresów widać, że opracowany moduł wykrywa obecność badanych substancji, a piki detekcji badanych gazów występują w tym samym czasie co dla czujników referencyjnych. Ponadto sygnały związane z wykryciem gazu przez opracowany moduł pojawiają się kilka sekund szybciej niż sygnały czujników referencyjnych (rys. 11). Jednak prawdopodobną przyczyną szybszego zadziałania modułu opracowanych czujników może

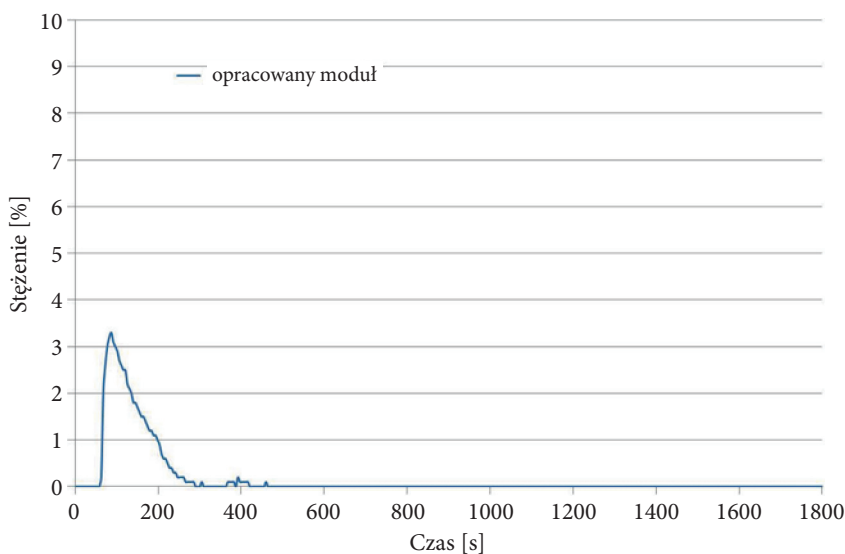
Rys. 8. Zależność stężenia SO_2 od czasuRys. 9. Zależność stężenia CO_2 od czasu

Rys. 10. Zależność stężenia O_2 od czasu

Rys. 11. Zależność stężenia HCl od czasu



Rys. 12. Zależność stężenia NO od czasu

Rys. 13. Zależność stężenia NH₃ od czasu

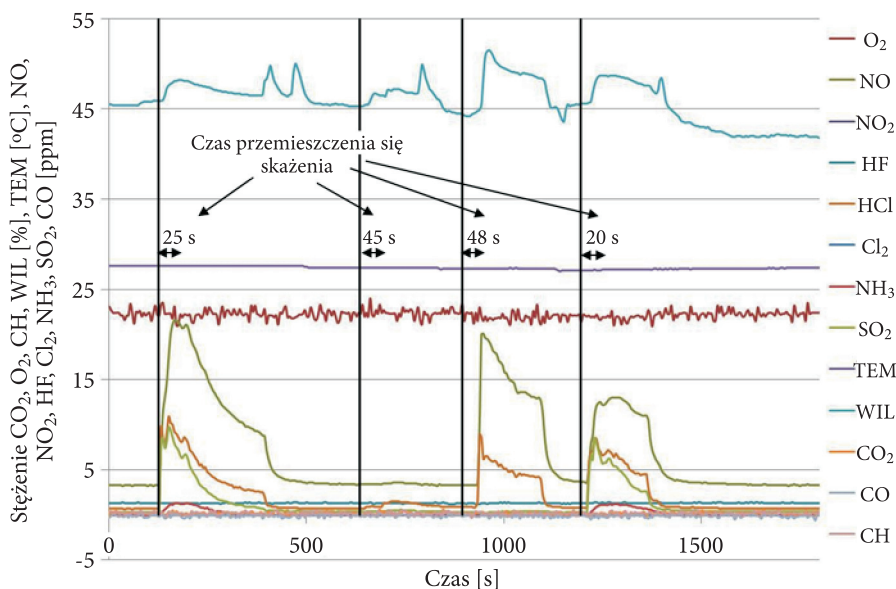
być szybsze dotarcie testowanego powietrza do sensora wymuszone przepływem sterowanym pompką zasysającą. Natomiast różne wskazania maksymalnego stężenia rejestrowane przez czujniki mogą wynikać z niejednorodnego rozkładu skażenia w komorze. Swobodne rozprzestrzenianie się w komorze punktowo wstrzykniętego gazu nie daje możliwości uzyskania jednorodnego rozkładu. Jest to szczególnie widoczne

na rysunku 11, gdzie przy kolejnych napełnieniach komory, raz jeden czujnik pokazuje wyższą wartość, a zaraz potem drugi. Ekspotencjalny zanik stężenia w komorze jest związany z rozprzestrzenianiem się skażenia w jej wnętrzu (rys. 12). Otwarcie komory pomiarowej jest uwidocznione poprzez gwałtowny spadek stężenia (rys. 12). Niewielka różnica stężenia tlenu wskazywana przez czujniki może być spowodowana mało dokładnymi danymi podanymi przez producenta sond wykorzystanymi do skalowania sondy elektrochemicznej tlenu (rys. 10). Gaz NH_3 został wpuszczony do komory tylko jeden raz w pierwszej mieszaninie gazów (rys. 13), co jest widoczne poprzez pojawienie się tylko jednego pików. Stężenie CO_2 w mieszaninie gazów niewiele różniło się od stężenia występującego w powietrzu atmosferycznym (rys. 9).

7. Badania czasu reakcji modułu na występujące skażenie

Test ten przeprowadzono w układzie pomiarowym pokazanym na rysunku 7. Dokonywano pomiaru czasu, w którym wpuszczono skażenie do komory, oraz czasu pojawienia się pików odpowiedzi opracowanego modułu.

Na rysunku 14 pokazano wykres wszystkich substancji mierzonych przez opracowany moduł podczas pomiaru. Czarne, pionowe linie wyznaczają czas, w którym wpuszczono mieszaninę gazów do komory pomiarowej. Różnica czasu pomiędzy wpuszczeniem skażenia a połową wysokości pików odpowiedzi modułu wynosiła 20 s,



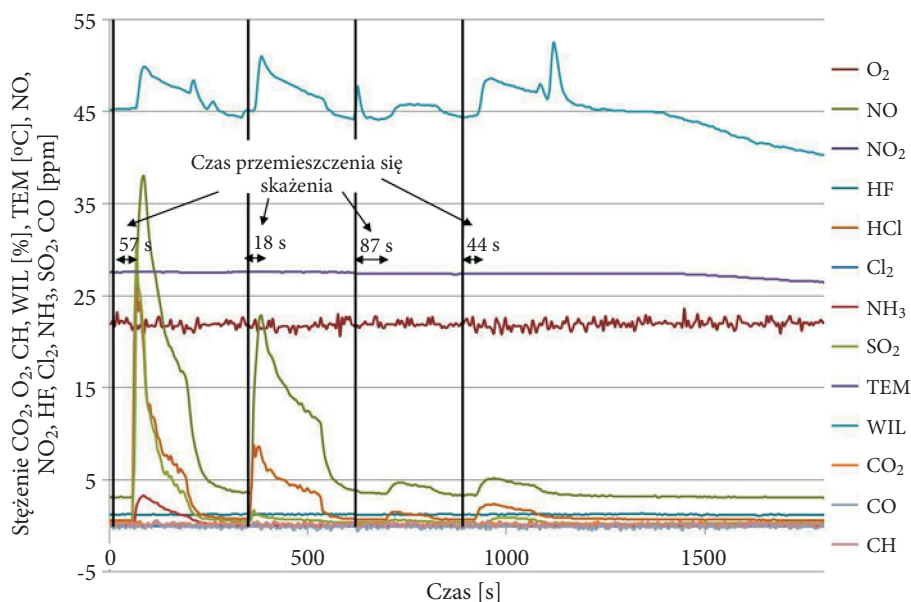
Rys. 14. Zależność stężenia wszystkich substancji detekowanych przez moduł od czasu

48 s, 45 s i 25 s. Duże różnice czasów reakcji oraz ich wysokie wartości potwierdzają niejednorodność swobodnego rozprzestrzeniania się mieszaniny gazów w komorze. Czas własny reakcji czujnika wynosi ok. 5 s i jest związany głównie z czasem zadziałania samych sensorów, czasem przetworzenia sygnału elektronicznego przez układ elektroniczny oraz czasem wysłania danych do komputera.

Obserwowany niewielki wzrost wilgotności wewnątrz komory powodowany wypuszczeniami badanych substancji związany był z występowaniem niewielkiej ilości pary wodnej w mieszaninie gazów.

8. Badania powtarzalności pomiarów

Badania powtarzalności pomiarów polegały na przeprowadzaniu pomiarów stężenia w tych samych warunkach po kilku dniach od poprzednich. Na rysunku 15 pokazano wykres wszystkich substancji mierzonych przez moduł podczas pomiaru przeprowadzonego po 4 dniach od pomiarów, których wyniki prezentowano na rysunku 14. Uwzględniając niejednorodności związane z rozprzestrzenianiem się badanych substancji w komorze pomiarowej, to porównując rysunki 14 oraz 15, można stwierdzić podobne działanie modułu. Wykrywane są te same substancje przy podobnych stężeniach.



Rys. 15. Zależność stężenia wszystkich substancji detekowanych przez moduł od czasu (wykonany po 4 dniach)

9. Podsumowanie

W artykule przedstawiono opis budowy i działania opracowanego modułu czujników substancji chemicznych. Zaprezentowano również wyniki badań, które potwierdzają, że opracowany moduł czujnikowy spełnia postawione przed nim wymagania. W tabeli 2 przedstawiono krótkie podsumowanie poszczególnych badań.

TABELA 2

Podsumowanie badań modułu

| Rodzaj badania | Wynik i uwagi |
|---|---|
| Przerwanie połączenia transmisji danych w trakcie przesyłania danych | Brak wpływu na pracę czujnika |
| Przerwanie zasilania w trakcie przesyłania danych | Brak wpływu na pracę czujnika |
| Pobór mocy w czasie pracy | 7,2 W |
| Czas konieczny do gotowości do działania od chwili włączenia urządzenia | 10 min |
| Wielogodzinna praca urządzenia | Praca prawidłowa |
| Pomiar substancji chemicznych oraz wilgotności i temperatury | Praca prawidłowa z założoną rozdzielczością |
| Czas wyświetlenia wyniku od pojawienia się skażenia | 5 s |
| Powtarzalność pomiarów | Prawidłowy |

Artykuł wpłynął do redakcji 28.05.2014 r. Zweryfikowaną wersję po recenzji otrzymano 6.08.2014 r.

Praca była finansowana w ramach projektu z funduszy strukturalnych Nr NCBiR POIG.01.01.02.-00-014-08, pt. „Zintegrowany, mobilny system wspomagający działania antyterrorystyczne i antykrzysowe — PROTEUS”.

LITERATURA

- [1] ISHIDA H., WADA Y., MATSUKURA H., *Chemical sensing in robotic applications: A review*, IEEE Sensors Journal, 12, nr 11, 2012, 3163-3173.
- [2] LILIENTHAL A.J., LOUTFI A., DUCKETT T., *Airborne chemical sensing with mobile robots*, Sensors, 6, nr 11, 2006, 1616-1678.
- [3] RUSSELL R.A., THIEL D., DEVEZA R., MACKAY-SIM A., *Robotic system to locate hazardous chemical leaks*, Proc. of IEEE, International Conference on Robotics and Automation, 1, 1995, 556-561.
- [4] TRINCAVELLI M., REGGENTE M., CORADESCHI S., LOUTFI A., ISHIDA H., LILIENTHAL A.J., *Towards environmental monitoring with mobile robots*, Proc. of IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, 4650755, 2008, 2210-2215.
- [5] PANDEY S.K., KIM K.H., TANG K.T., *A review of sensor-based methods for monitoring hydrogen sulphide*, TrAC — Trends in Analytical Chemistry, 32, 2012, 87-99.
- [6] PANG W., ZHAO H., KIM E.S., ZHANG H., YU H., HU X., *Piezoelectric microelectromechanical resonant sensors for chemical and biological detection*, Lab on a Chip, 12, nr 1, 2012, 29-44.

- [7] WŁODARSKI M., KALISZEWSKI M., KWASNY M., KOPCZYNSKI K., ZAWADZKI Z., MIERCZYK Z., MLYNCZAK J., *Fluorescence excitation-emission matrices of selected biological materials*, Proc. of SPIE — The International Society for Optical Engineering, 6398, 2006, 1-12.
- [8] FEUGNET G., LALLIER E., GRISARD A., MCINTOSH L., HELLSTROM J.E., JELGER P., LAURELL F., ALBANO CH., KALISZEWSKI M., KWASNY M., KOPCZYNSKI K., ZAWADZKI Z., MIERCZYK Z., MLYNCZAK J., ROSTEDT A., PUTKIRANTA M., MARJAMAKI M., KESKINEN J., ENROTH J., JANKA K., REINIVAARA R., HOLMA L., HUMPPI T., BATTISTELLI E., ILIAKIS E., GEROLIMOS G., *Improved laser-induced fluorescence method for bio-attack early warning detection system*, Proc. of SPIE — The International Society for Optical Engineering, 7116, 2008, 1-11.
- [9] KALISZEWSKI M., WŁODARSKI M., BOMBALSKA A., KWAŚNY M., MULARCZYK-OLIWA M., MŁYŃCZAK J., KOPCZYŃSKI K., *The Application of Semiconductor Based UV Sources for the Detection and Classification of Biological Material*, Proc. of SPIE — The International Society for Optical Engineering, 8703, 2013, 1-8.
- [10] KALISZEWSKI M., TRAFNY E.A., LEWANDOWSKI R., WŁODARSKI M., BOMBALSKA A., KOPCZYŃSKI K., ANTOS-BIELSKA M., SZPAKOWSKA M., MULARCZYK-OLIWA M., MŁYŃCZAK J., KWAŚNY M., *A new approach to UVAPS data analysis towards detection of biological aerosol*, Journal of Aerosol Science, 58, 2013, 148-157.
- [11] KUBICKI J., MŁYŃCZAK J., KOPCZYŃSKI K., *Application of modified difference absorption method to stand-off detection of alcohol in simulated car cabins*, Journal of Applied Remote Sensing, 7, nr 1, 2013, 073529-1- 073529-13.
- [12] SHIMIZU N., FURUTA T., KOHJIRO S., SUIZU K., KADO Y., KOMIYAMA S., *Stand-off gas sensing system based on Terahertz spectroscopy*, Journal of the National Institute of Information and Communications Technology, 55, nr 1, 2008, 165-170.
- [13] MIERCZYK Z., *Laser systems for stand-off detection of contamination and pollution of atmosphere*, Proc. of SPIE — The International Society for Optical Engineering, 6598, 2007.
- [14] PREL F., MOREAU L., LAVOIE H., BOUFFARD F., THÉRIAULT J.M., VALLIERES C., ROY C., DUBÉ D., *Real time stand-off gas detection and environmental monitoring with LWIR hyperspectral imager*, Proc. of SPIE — The International Society for Optical Engineering, 8546, 2012.
- [15] MISRA A.K., SHARMA S.K., ACOSTA T.E., PORTER J.N., BATES D.E., *Single-pulse stand-off Raman detection of chemicals from 120 m distance during daytime*, Applied Spectroscopy, 66, nr 11, 2012, 1279-1285.
- [16] MIERCZYK Z., KOPCZYŃSKI K., ZYGMUNT M., WOJTANOWSKI J., MŁYŃCZAK J., GAWLIKOWSKI A., MŁODZIANKO A., PIOTROWSKI W., GIETKA A., KNYSAK P., DROZD T., MUZAL M., KASZCZUK M., OSTROWSKI R., JAKUBASZEK M., *Fluorescence/depolarization LIDAR for mid-range stand-off detection of biological agents*, Proc. of SPIE — The International Society for Optical Engineering, 8037, 2011, 1-9.
- [17] MŁYŃCZAK J., KUBICKI J., KOPCZYŃSKI K., *Stand-off detection of alcohol in car cabins*, Journal of Applied Remote Sensing, 8, nr 1, 2014, 083627-1- 083627-7.
- [18] BRZÓZKA Z., WRÓBLEWSKI W., *Sensory chemiczne*, Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, 1998.
- [19] GALUS Z., *Teoretyczne podstawy elektroanalizy chemicznej*, PWN, 1977.
- [20] WANG J., *Analytical electrochemistry*, Wiley-VCh, 2006.
- [21] STETTER J.R., PENROSE W.R., YAO S., *Sensors, chemical sensors, electrochemical sensors and ECS*, Journal of the Electrochemical Society, 150, nr 2, 2003, S11-S16.
- [22] GUTH U., VONAU W., ZOSEL J., *Recent developments in electrochemical sensor application and technology — A review*, Measurement Science and Technology, 20, nr 4, 2009, 1-14.

- [23] SILVESTER D.S., *Recent advances in the use of ionic liquids for electrochemical sensing*, *Analyst*, 136, nr 23, 2011, 4871-4882.
- [24] BAKKER E., TELTING-DIAZ M., *Electrochemical sensors*, *Analytical Chemistry*, 74, 2002, 2781-2800.
- [25] www.draeger.com.
- [26] HODGKINSON J., TATAM R.P., *Optical gas sensing: A review*, *Measurement Science and Technology*, 24, nr 1, 2013, 1-59.
- [27] PYUN S.H., CHO J., DAVIDSON D.F., HANSON R.K., *Interference-free mid-IR laser absorption detection of methane*, *Measurement Science and Technology*, 22, nr 2, 2011, 1-9.
- [28] YOSHII Y., KUZE H., TAKEUCHI N., *Wavelength modulation detection of trace gas using a Fabry-Pérot cavity*, *Pacific Rim Conference on Lasers and Electro-Optics, CLEO — Technical Digest*, 1, 2001, I150-I151.
- [29] MURAVIEV A.V., MAUKONEN D.E., FREDRICKSEN C.J., MEDHI G., PEALE R.E., *Quantum cascade laser intracavity absorption spectrometer for trace gas sensing*, *Applied Physics Letters*, 103, nr 9, 2013, 091111-1 – 091111-4.
- [30] BAEV V.M., LATZ T., TOSCHEK P.E., *Laser intracavity absorption spectroscopy*, *Applied Physics B: Lasers and Optics*, 69, 1999, 171-202.
- [31] MAZZOTTI D., BARTALINI S., BORRI S., CANCIO P., GALLI I., GIUSFREDI G., DE NATALE P., *Optical detection of molecular species at sub-ppt concentration levels*, *Conference on Lasers and Electro-Optics Europe CLEO EUROPE/EQEC*, 2011, 1-1.
- [32] <http://www.projektproteus.pl/>

J. MŁYŃCZAK, K. KOPCZYŃSKI, M. MAZIEJUK, J. MIERCZYK

Multigas module of chemical contaminant sensors

Abstract. The paper describes the construction and the results of investigations of the multigas module of chemical contaminants sensors. The module is able to detect 11 different volatile chemical agents simultaneously and this number can be increased if needed. The module was designed and built as a device installed on mobile unmanned platform for anti-crisis application.

Keywords: chemical sensor, chemical contaminants, electrochemical sensor, optical sensor