

Moduł czujnikowy do pomiarów stężeń lotnych związków organicznych dla miniaturowych platform latających

Streszczenie. Praca opisuje opracowany miniaturowy system pomiarowy z półprzewodnikowym czujnikiem gazów, dedykowany do pomiarów stężeń lotnych związków organicznych w trybie mobilnym, z wykorzystaniem miniaturowego czterowirnikowego śmigłowca jako platformy nośnej. W artykule przedstawione zostały charakterystyki statyczne i dynamiczne opracowanego modułu pomiarowego, wraz z procedurą kalibracji. Wstępne eksperymenty wykazały potencjalną przydatność takiego rozwiązania w systemach inspekcyjnych np. w zadaniu lokalizacji źródeł wycieków.

Abstract. This study describes developed miniature measuring system based on semiconductor gas sensor, dedicated to measurements of concentrations of volatile organic compounds in mobile mode, using a miniature quadcopter as carrier platform. This article presents static and dynamic characteristics of developed sensor module and the calibration procedure. Preliminary experiments have demonstrated the potential usefulness of such solution in inspection systems such as localization of leaks in industries. (**Sensor module for measurements of volatile organic compounds concentration for miniature flying platforms**)

Słowa kluczowe: platforma latająca, półprzewodnikowe czujniki gazów, lokalizacja źródeł emisji zanieczyszczeń
Keywords: flying platform, semiconductor gas sensors, pollution emission localization

doi:10.12915/pe.2014.11.40

Wprowadzenie

Obecnie obserwuje się dynamiczny rozwój bezzałogowych statków powietrznych, (ang. Unmanned Aerial Vehicle, UAV, lub Unmanned Aerial System, UAS [1]), które oprócz zastosowań ściśle wojskowych stają się coraz powszechniej wykorzystywane w szeregu rozmaitych zadań cywilnych [2], takich jak tworzenie map trójwymiarowych [3] transport [4], rolnictwo [5, 6], budownictwo [7], odczyt liczników radiowych na terenach rzadko zaludnionych [8] a nawet pokazy artystyczne [9]. Małe platformy latające doskonale nadają się na przykład do automatyzacji prac inspekcyjnych, także w ochronie środowiska [10]. Wyposażenie ich w moduły służące do pomiaru stężeń lotnych związków organicznych byłoby istotnym rozszerzeniem ich funkcjonalności o możliwość wykrywania skażeń, wycieków i szacowania emisji lotnych substancji chemicznych.

Spośród wszystkich rodzajów autonomicznych statków latających, z uwagi na prostą budowę mechaniczną, łatwe sterowanie i możliwość miniaturyzacji, szczególną popularnością wyróżnia się śmigłowiec wielowirnikowy. Taki układ lokomocji posiada 4 sterowania - prędkości obrotowe poszczególnych wirników, które wywołują określoną siłę ciągu na każdym z ramion platformy, pozwalając na realizację praktycznie dowolnej trajektorii w przestrzeni trójwymiarowej. Prostość układu lokomocji pozwala na daleko posuniętą miniaturyzację takiej platformy, na przykład komercyjny zdalnie sterowany model Estes Proto X (wg. producenta był to najmniejszy model na świecie na początku roku 2014) posiada wymiary 45x45 mm (wliczając rozpiętość śmigieł) oraz masę 11 g. Otwarta (opensource i openhardware) platforma CrazyFlie posiada wymiary 90x90 mm i masę 20 g, z maksymalnym udźwignięciem do 15 g. Nieco większe platformy o rozpiętości osi wirników rzędu 20 cm są obecnie już szeroko rozpowszechnione. Do testów modułów czujnikowych wykorzystano tego rodzaju platformę zdalnie sterowaną o masie około 80 g, przedstawioną na rys. 1.

Rozmiar platformy ma istotne znaczenie w konkretnych zastosowaniach i przede wszystkim wpływa na:

- masę użyteczną wynoszoną przez platformę nośną,
- stabilność i odporność na nagłe podmuchy powietrza,
- bezwładność i precyzję sterowania,
- możliwość poruszania się w ograniczonej przestrzeni,
- skalę turbulentnych zaburzeń wprowadzanych do powietrza otaczającego wiropląt.



Rys. 1. Miniaturowa platforma latająca użyta do eksperymentów z modułem czujnikowym.

Zastosowanie jak najmniejszych platform jest szczególnie pożądane w przypadku rozwiązań dedykowanych do pracy wewnątrz budynków. Z uwagi na błąd sterowania związany ze znaczną bezwładnością należy zawsze zapewnić odpowiednią wolną przestrzeń - strefę bezpieczną pomiędzy przeszkodami a poruszającą się platformą. Dodatkowo w pobliżu przeszkód rozkład prędkości może się zmieniać i w związku z tym mogą się pojawić dodatkowe błędy sterowania. W przypadku dużych i ciężkich platform, ta strefa musi być znaczna, mierzona w metrach.

Zmiana pędu powietrza wywoływana przez wirnik musi równoważyć całkowity ciężar platformy, a zatem im większa jest jej masa, tym strumień powietrza przepływającego przez wirnik musi być większy, co powoduje wzrost odległości, w której pojawiają się istotne zaburzenia naturalnego rozkładu prędkości powietrza, co może powodować również jest większą zmianę pierwotnej dystrybucji stężenia gazu.

Rozmiary platform przeznaczonych do lotów w środowisku zewnętrznym nie są szczególnie ograniczone, a duża precyzja lotu nie jest wymagana, dlatego profesjonalne śmigłowce wielowirnikowe, np. przeznaczone do wykonywania zdjęć i filmów z lotu ptaka są dość duże i ciężkie, co zapewnia odpowiedni udźwignięcie i stabilność. W przypadku platform przeznaczonych do lotów w przestrzeniach zamkniętych, takich jak hale produkcyjne, korytarze czy magazyny, platformy latające muszą być znacznie mniejsze, tak aby można było zapewnić bezpieczną trajektorię przelotu w otoczeniu zawierającym przeszkody. Opracowanie systemu pozwalające

go na autonomiczną realizację zadania omijana przeszkód przez taki śmigłowiec jest obecnie przedmiotem badań [11].

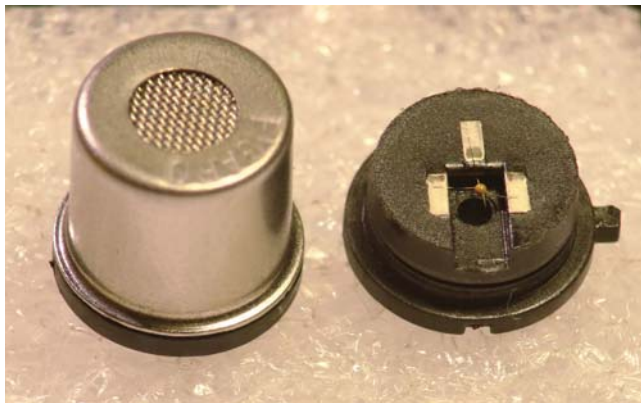
Małe rozmiary platformy wymuszają dość silne ograniczenie na maksymalnej masie układów użytecznych. Niniejsza praca jest próbą zbadania możliwości budowy mobilnego systemu pomiarowego w oparciu o małą platformę latającą, która byłaby zdolna do wykonywania lotów w ograniczonej przestrzeni.

Kolejnym ograniczeniem małych platform latających jest krótki czas pracy na akumulatorach elektrycznych, przeważnie rzędu kilkunastu minut lotu. Rozwiązaniem tego problemu mogą okazać się miniaturowe ogniwa paliwowe (masa 30g, przy mocy nominalnej 12 W) opracowane przez Instytut Fraunhofer [12].

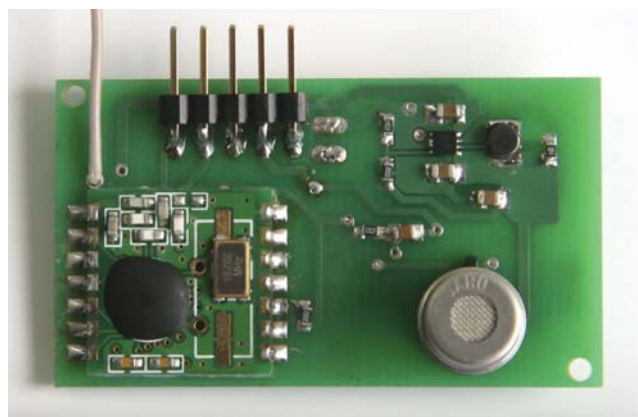
Wewnątrz budynków stosowanie najpopularniejszego sposobu pozycjonowania w przestrzeni z wykorzystaniem satelitarnego systemu GPS, jest niemożliwe z uwagi na zbyt słaby sygnał, nie przechodzący przez ściany, oraz zbyt niską dokładność, dlatego należy stosować alternatywne metody z wykorzystaniem systemów wizyjnych, przepływu optycznego lub np. sygnału radiowego i metody ODV [13].

Budowa modułu czujnikowego

Podstawowym elementem wykorzystanym do budowy układu pomiarowego jest komercyjny półprzewodnikowy czujnik gazów TGS 3820 [14] (rys. 2), dedykowany przez producenta do pomiarów stężeń par etanolu. Jak powszechnie wiadomo czujniki tego rodzaju nie są selektywne i mogą posłużyć do wykrywania obecności w powietrzu szerokiej rodziny lotnych związków organicznych. Czujnik TGS 3820 należy do najnowszej serii czujników i został wykonany w technologii micro beads. Według informacji producenta czujniki z tej serii powinny charakteryzować się szybszą reakcją na zmianę stężenia w porównaniu do starszych czujników, co jednak nie zostało jednoznacznie potwierdzone eksperymentalnie w trakcie przeprowadzonych pomiarów. Dzięki zmniejszeniu rozmiarów elementu gazoczułego, istotnie zmniejszono (do wartości poniżej 100mW) zapotrzebowanie na moc do utrzymywania czujnika w odpowiednio wysokiej temperaturze. Element grzejny zasilany jest napięciem 0.8 V, w celu uzyskania takiego napięcia przy zachowaniu wysokiej sprawności zastosowano miniaturową przetwornicę impulsową obniżającą napięcie w oparciu o układ scalony TPS62080 [15]. Odpowiedzią czujnika odpowiadającą wartości stężenia gazu jest konduktancja czujnika. Producent zaleca pomiar rezystancji w układzie dzielnika napięcia z rezystorem odniesienia o stałej wartości, oraz zaleca odczytywanie wartości z czujnika w trybie impulsowym ($t_{ON} = 5 \text{ ms}$, $T = 100 \text{ ms}$). Jest istotne ograniczenie częstotliwości próbkowania do dość



Rys. 2. Czujniki TGS serii 3000, użyte do budowy modułu pomiarowego.



Rys. 3. Moduł czujnikowy do umieszczenia na platformie mobilnej.

niskiej wartości 10 Hz. W przypadku pomiarów na platformie mobilnej, biorąc pod uwagę występowanie różnego rodzaju zakłóceń, możliwość szybszego próbkowania pozwoliłaby na lepszą cyfrową filtrację sygnału i wydajniejszą redukcję zakłóceń. W tym celu zdecydowano się na pięciokrotne skrócenie interwału pomiędzy kolejnymi pomiarami, przy jednoczesnym skróceniu czasu trwania impulsu pomiarowego i obniżeniu napięcia z 5 do 3.3 V co pozwoliło na zachowanie takiej samej średniej mocy wydzielanej na czujniku. Jednocześnie pozwoliło to na zachowanie jednakowej wartości napięcia zasilającego układy analogowe i cyfrowe (3.3 V). Źródłem zasilania dla modułu czujnikowego był akumulator litowo-polimerowa o napięciu znamionowym 3.7 V i pojemności 500 mAh (oryginalna bateria platformy latającej). Napięcie było stabilizowane z wykorzystaniem liniowego regulatora o niskim spadku napięcia, oraz dodatkowo filtra LC dla części analogowej układu.

Centralną jednostką obliczeniową modułu pomiarowego był 32 bitowy mikrokontroler STM32f103rbt6, do pomiarów wykorzystano wbudowany 12 bitowy analogowo cyfrowy przetwornik SAR, o maksymalnej częstotliwości próbkowania do 2MHz. Ponieważ częstotliwość próbkowania była znacznie wyższa niż potrzebna częstotliwość użyteczna, zdecydowano się na zastosowanie metody nadpróbkowania i zwiększenie rozdzielczości przetwornika o 4 bity, do 16.

Moduł czujnikowy zapewnia możliwość komunikacji bezprzewodowej na częstotliwości 868 MHz w wykorzystaniu modułu RFM12b [16]. Teoretyczny zasięg w terenie otwartym to ok. 200 m. W czasie badań stwierdzono niezawodną komunikację wewnątrz budynków w promieniu kilkudziesięciu metrów od odbiornika (z wykorzystaniem prostych anten ćwierćfalowych, przy szybkości transmisji 16,420kbps). Wygląd modułu przedstawiono na rysunku 3.

W momencie uruchomienia platformy pomiarowej moduł uruchamia się automatycznie i natychmiast rozpoczyna transmisję pakietów danych pomiarowych zawierających wartość aktualnego pomiaru, z częstotliwością 50 Hz. Dane były odbierane, archiwizowane i wizualizowane w czasie rzeczywistym z wykorzystaniem modułu odbiorczego i odpowiedniej aplikacji graficznej na komputerze PC.

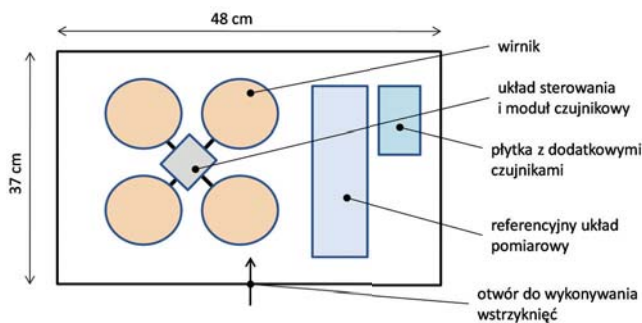
Masa całego modułu czujnikowego wynosi około 10g, co nie wpływa w sposób widoczny na pogorszenie osiągnięć platformy, pobór prądu przez moduł czujnikowy (80 mA) jest około 30 krotnie mniejszy od wartości pobieranej przez cztery silniki (około 2,5 A), i nie wpływa znacząco na skrócenie czasu pracy na baterii.

Kalibracja układu czujnikowego

Ruch mas powietrza wywołany przez wirniki platformy latającej może w istotny sposób wpłynąć na pomiary przeprowadzane w trybie mobilnym, dlatego zdecydowano się na kalibrację czujnika w warunkach odpowiadających warunkom rzeczywistym, tzn. przy aktywnych silnikach śmigłowca. Platforma latająca wraz z układem czujnikowym została umieszczona w odpowiedniej komorze testowej (rys. 4). Po uruchomieniu silników pewna ściśle określona ilość ciekłego związku (etanolu, acetonu lub octanu etylu) była wstrzykiwana z wykorzystaniem precyzyjnej strzykawki ($\Delta V = 0.1 \mu\text{l}$) do wnętrza komory, gdzie z uwagi na silny ruch mas powietrza i małą ilość związku (0 - 10 μl) bardzo szybko odparowywała. Stosując taką metodę w komorze o objętości 35 l można było uzyskać stężenia w zakresie 0-100 ppm, z powtarzalnością ok. 1 ppm. Stężenia tego rzędu spotykane są np. na stanowiskach pracy w wielu gałęziach przemysłu.

Po dwuminutowej ekspozycji na określone stężenie gazu komora była otwierana i następowała wymiana atmosfery z czystym powietrzem zewnętrznym. Po całkowitym wypłukaniu komora była zamykana i przygotowywana do kolejnej próby.

W czasie eksperymentu rejestrowane były pomiary odpowiedzi modułu czujnikowego i referencyjnego czujnika fotojonizacyjnego a także dodatkowo rejestrowano parametry odniesienia takie jak wilgotność i temperatura powietrza oraz ciśnienie.



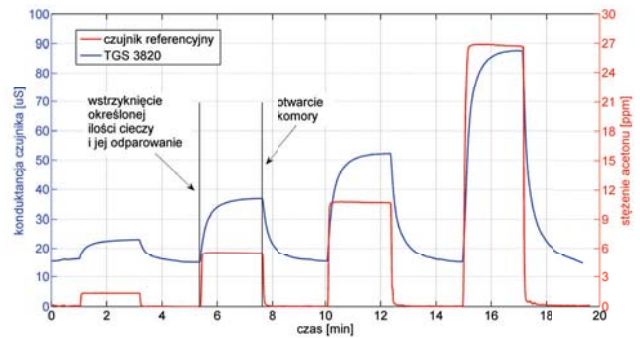
Rys. 4. Schemat stanowiska pomiarowego

Przebieg przykładowego eksperymentu dla czterech kolejnych wstrzyknięć porcji o różnej objętości, wraz z odpowiedzią czujnika referencyjnego przedstawiono na rys.5. Na podstawie wartości odpowiedzi czujników w stanie ustalonym otrzymano krzywe kalibracyjne dla 3 wybranych lotnych związków organicznych, przedstawione na rys.6. Można zaobserwować, że w przypadku badanych rozpuszczalników organicznych takich jak aceton, etanol i octan etylu czułość układu dla wszystkich związków jest porównywalna. Układ jest zdolny do pomiarów stężeń rzędu pojedynczych ppm. W przypadku stężeń poniżej 1 ppm wpływ wilgotności i temperatury jest zbyt duży aby można było mówić o pomiarach stężeń.

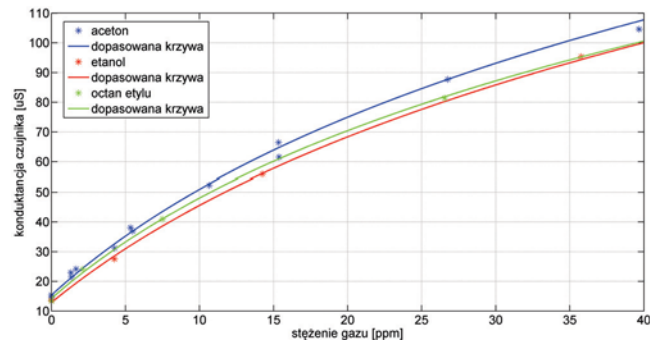
Należy zauważyć, że przed rozpoczęciem pomiaru czujniki półprzewodnikowe wymagają określonego czasu na stabilizację po włączeniu zasilania. W przypadku badanego układu po ponad 12 godzinach od wyłączenia zasilania czas stabilizacji po uruchomieniu wynosił około 15 minut.

Wyznaczenie charakterystyki dynamicznej czujnika

Ponieważ w trakcie ruchu platformy mobilnej stężenie może się szybko zmieniać, znaczna bezwładność czujników chemicznych jest bardzo istotnym problemem przy mobilnym trybie pomiarowym. Do wyznaczenia odpowiednich stałych czasowych należałoby zastosować stanowisko pomiarowe z



Rys. 5. Przykładowa seria kalibracyjna w komorze testowej.



Rys. 6. Wyznaczenie krzywej kalibracyjnej dla trzech wybranych lotnych związków organicznych.

próbą gazu o zmiennym w czasie stężeniu. Przy przeprowadzaniu pomiarów kalibracyjnych, stwierdzono, że metoda wstrzyknięć pozwala dobrze odzwierciedlić skokową zmianę stężenia w komorze, pod warunkiem, że:

- wstrzyknięta ilość cieczy odparowuje w czasie znikomo małym w porównaniu z bezwładnością czujników,
- stężenie gazu uzyskuje rozkład równomierny w całej objętości komory, w czasie znikomo małym w porównaniu ze stałą czasową T czujników.

W przypadku bardzo lotnych związków takich jak aceton, z uwagi na bardzo małe (rzędu pojedynczych μl) objętości wstrzyknięć, założenie odparowania w znikomo krótkim czasie jest uzasadnione. W przypadku małej objętości komory ($V = 35 \text{ l}$), bardzo duży wpływ mieszania powietrza w objętości komory poprzez aktywne wirniki platformy pozwala również na założenie, że zmiana stężenia jest szybko uśredniana w całej objętości komory.

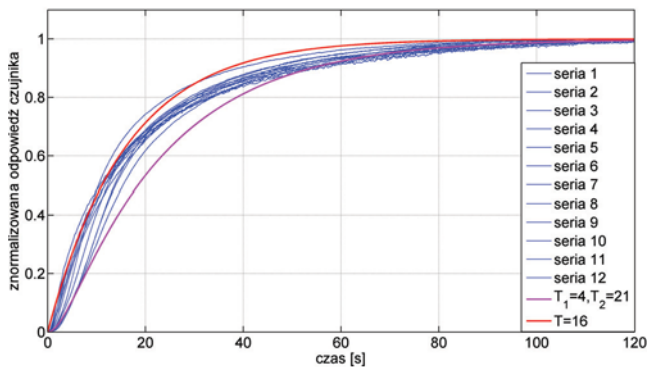
W celu łatwego porównania ze sobą poszczególnych serii pomiarowych, wprowadzono znormalizowaną odpowiedź czujnika, zgodnie ze wzorem:

$$(1) \quad y_n(t) = \frac{y(t) - y_0}{y_{ust} - y_0}$$

gdzie y_0 jest odpowiedzią czujnika w przypadku zerowego pobudzenia (dla czystego powietrza tuż przed podaniem próby), zaś y_{ust} jest odpowiedzią czujnika w stanie ustalonym. Następnie wyznaczono wartości stałych czasowych, przyjmując, że obiekt ma charakterystykę członu inercyjnego I rzędu postaci:

$$(2) \quad y(t) = 1 - \exp\left(-\frac{t}{T}\right)$$

Na rysunku 7 zebrano 12 odpowiedzi czujników na skokową zmianę stężenia. Można zauważyć dość istotny rozrzut poszczególnych serii pomiarowych, co może wskazywać na istnienie pewnych czynników losowych, wpływających na szybkość reakcji czujnika, takich jak np. zmiana orientacji



Rys. 7. Wyznaczenie stałej inercji układu czujnikowego. Linia czerwona oznaczono charakterystykę obiektu inercyjnego I rzędu o stałej czasowej $T=16$ s, linią różową charakterystykę obiektu inercyjnego II rzędu o stałych $T_1=4$ s, $T_2=21$ s.

modułu czujnikowego, co wskazuje, że poczynione założenia są spełnione tylko w pewnym przybliżeniu. Wartość stałej czasowej można oszacować na ok. 16-20 s.

Ponieważ na podstawie przeprowadzonych pomiarów zauważono mimo wszystko dość dobre dopasowanie sygnałów do zaproponowanego modelu, podjęto się próby opracowania cyfrowej filtracji sygnału czujnikowego, pozwalającej na redukcję bezwładności. Dla systemu liniowego opisanego transmitancją

$$(3) \quad G(s) = \frac{Y(s)}{U(s)} = \frac{1}{1 + Ts}$$

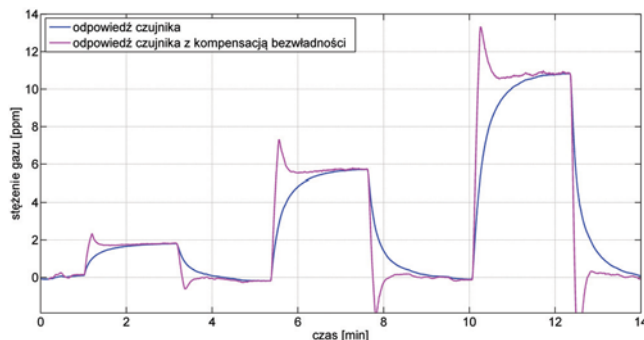
można odzyskać przebieg pobudzenia stosując filtrację:

$$(4) \quad U(s) = Y(s)(1 + Ts)$$

co odpowiada w dziedzinie czasu zależności:

$$(5) \quad u(t) = y(t) + T \frac{dy(t)}{dt}$$

Zastosowanie różniczkowania na zaszumionym sygnale pomiarowym, wprowadza znaczne błędy, dlatego posłużono się metodą filtracji ruchomą średnią i wygładzenia sygnału za pomocą aproksymacji wielomianowej a następnie różniczkowania wielomianu aproksymującego. Przedstawione wyniki kompensacji (rys. 8 przy zastosowaniu opisanej metody nie są zbyt obiecujące, z uwagi na znaczne "przekompensowanie" w pierwszej fazie reakcji na zmianę stężenia. Zaproponowany model kompensacji nie sprawdził się w przypadku nieliniowego obiektu jakim był półprzewodnikowy czujnik gazów. Zagadnienie to wymaga dalszych badań, w tym z zastosowaniem pobudzeń o różnym przebiegu innych niż skokowe.



Rys. 8. Zastosowane kompensacji bezwładności.

W poprzedniej pracy wykazano, że zastosowanie systemu pobierania próby gazu z aktywnym wymuszeniem prze-

plywu przez wnętrze czujnika pozwala na znaczne obniżenie całkowitej bezwładności systemu pomiarowego [17]. Taki układ byłby zdecydowanie większy i cięższy od samego modułu czujnikowego, zatem zastosowanie tej metody będzie możliwe jedynie w przypadku znacznie większych platform mobilnych, w przypadku najmniejszych platform, czujniki muszą pracować w trybie dyfuzyjnego pobierania próby.

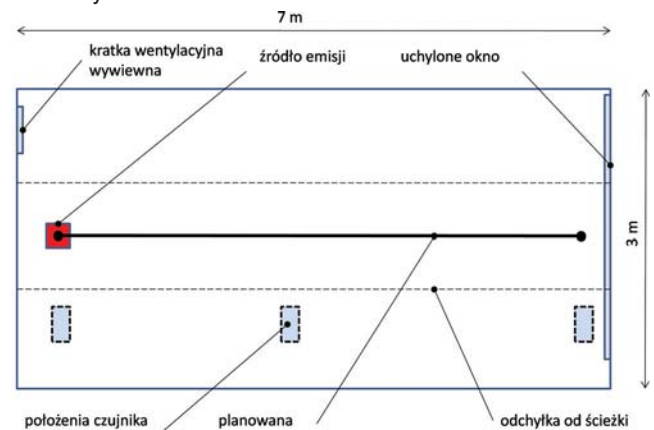
Pomiary w trybie mobilnym

Przeprowadzono pomiary odpowiedzi czujnika w trakcie przelotów w pomieszczeniu o wymiarach $3 \times 3 \times 7$ m (rys. 9). Po jednej stronie pomieszczenia umieszczono źródło acetonu w postaci gąbki nasączonej określoną (6ml) ilością acetonu, z drugiej strony pomieszczenia znajdowała się strefa wymiany powietrza z otoczeniem w postaci uchylonego okna. W ten sposób w objętości pomieszczenia utworzono pewien przestrzenny rozkład stężenia. Stężenia przy źródle, przy oknie albo pośrodku pomieszczenia były mierzone w kolejnych seriach z wykorzystaniem czujnika referencyjnego.

Sygnaly w trakcie trzech kolejnych powolnych przelotów wzdłuż pomieszczenia przedstawiono na rys. 10. Z uwagi na trudności ze sterowaniem platformy, odchyłki od planowanej trajektorii (wzdłuż pomieszczenia na stałej wysokości, jak na rys. 9) były dość znaczne i wynosiły do 50 cm w każdym z kierunków. Pomimo tych trudności udało się utworzyć w pewnym przybliżeniu powtarzalne warunki, a także przedstawić przebieg zmian sygnału czujnikowego wraz ze zmianą odległości od źródła w czasie lotu.

Na przedstawionym wykresie można łatwo zaobserwować zbliżanie się platformy do źródła emisji, oraz oddalanie się od źródła. Ponadto należy zauważyć zgodność odpowiedzi systemu mobilnego z referencyjnym stacjonarnym systemem pomiarowym.

Taka informacja o stężeniu może posłużyć do opracowania odpowiedniego algorytmu sterowania platformą w celu autonomicznej realizacji zadania poszukiwania źródeł emisji zanieczyszczeń.

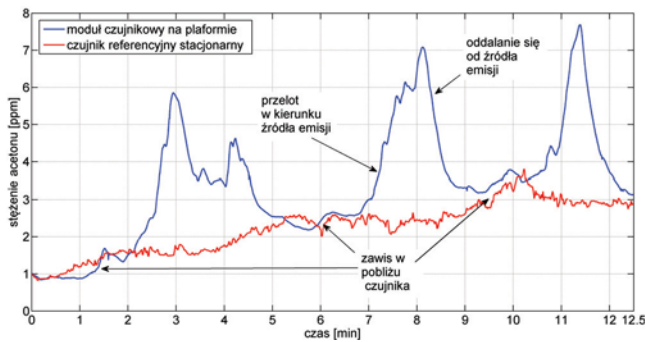


Rys. 9. Schemat organizacji eksperymentu do wyznaczenia odpowiedzi modułu czujnikowego w trakcie przelotu przez pomieszczenie.

Podsumowanie i plan dalszych badań

Przedstawione rezultaty wstępnych badań dotyczących wykorzystania małych latających platform pomiarowych do pomiarów trójwymiarowych rozkładów stężeń potwierdzają możliwość zastosowania czujników gazów w mobilnych systemach inspekcyjnych. Przy zachowaniu bardzo niewielkich nakładów finansowych zbudowano funkcjonalną latającą platformę pomiarową oraz wyznaczono charakterystyki statyczne i dynamiczne układu pomiarowego.

Planowane są dalsze badania z zastosowaniem za-



Rys. 10. Przykładowa seria pomiarowa w trybie mobilnym. Czujnik referencyjny umieszczony przy oknie.

awansowanej miniaturowej platformy latającej wyposażonej w bardziej precyzyjne czujniki inercyjne, charakteryzującej się większą stabilnością lotu. W celu dokładnego określenia zdolności modułu do wyznaczania przestrzennego rozkładu stężeń w czasie rzeczywistym planuje się wykorzystanie systemu rejestrowania ruchu w przestrzeni trójwymiarowej (ang. motion capture) i sieci referencyjnych stacjonarnych czujników gazów. Takie stanowisko pozwoli również na sprawdzenie efektywności metod numerycznej kompensacji bezwładności dla rzeczywistych przebiegów zmian stężeń w trakcie lotu.

Ponadto rozpoczęto badania nad specjalnym systemem dynamicznego pobierania próby, z wykorzystaniem miniaturowej pompki membranowej, przeznaczonym dla matrycy czujnikowej dedykowanej dla większej platformy nośnej.

Rozwój platform latających, algorytmów sterowania, układów zasilania oraz samych czujników gazów, daje nadzieję na szybkie zastosowanie praktyczne mobilnych systemów pomiarowych, zarówno wewnątrz jak i na zewnątrz budynków, które mogłyby znaleźć zastosowanie w systemach bezpieczeństwa instalacji przemysłowych, do szacowania emisji zanieczyszczeń w ochronie środowiska, czy nawet w akcjach ratowniczych, przy poszukiwaniu ludzi.

LITERATURA

- [1] I. Colomina, P. Molina. Unmanned aerial systems for photogrammetry and remote sensing: A review. *{ISPRS} Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 92(0):79 – 97, 2014.
- [2] Rachel L. Finn, David Wright. Unmanned aircraft systems: Surveillance, ethics and privacy in civil applications. *Computer Law & Security Review*, 28(2):184 – 194, 2012.
- [3] Sebastian Siebert, Jochen Teizer. Mobile 3d mapping for surveying earthwork projects using an unmanned aerial vehicle (uav) system. *Automation in Construction*, 41(0):1 – 14, 2014.
- [4] World Economic Forum. Connected world transforming travel, transportation and supply chains, 2013. http://www3.weforum.org/docs/WEF_MO_ConnectedWorld_Report_2013.pdf.
- [5] Haitao Xiang, Lei Tian. Development of a low-cost agricultural remote sensing system based on an autonomous unmanned aerial vehicle (uav). *Biosystems Engineering*, 108(2):174 – 190, 2011.
- [6] P.J. Zarco-Tejada, R. Diaz-Varela, V. Angileri, P. Loudjani. Tree height quantification using very high resolution imagery acquired from an unmanned aerial vehicle (uav) and automatic 3d photo-reconstruction methods. *European Journal of Agronomy*, 55(0):89 – 99, 2014.
- [7] Federico Augugliaro, Ammar Mirjan, Fabio Gramazio, Matthias Kohler, Raffaello D'Andrea. Architectural fabrication of tensile structures with flying machines. *Green Design, Materials and Manufacturing Processes*, strony 513–518. CRC Press, 2013.
- [8] Gurkan Tuna. Design considerations of uav-aided automated meter reading. *Przeгляд Elektrotechniczny*, (11a):253–257, 2012.
- [9] Angela P Schoellig, Hallie Siegel, Federico Augugliaro, Raffaello D'Andrea. So you think you can dance? Rhythmic flight performances with quadcopters, in controls and art. *Controls and Art*, strony 73–105. Springer International Publishing, 2014.

- [10] United Nations Environment Programme. A new eye in the sky: Eco-drones. *Environmental Development*, 7(0):155 – 164, 2013.
- [11] K.Y. Chee, Z.W. Zhong. Control, navigation and collision avoidance for an unmanned aerial vehicle. *Sensors and Actuators A: Physical*, 190(0):66 – 76, 2013.
- [12] Fraunhofer, TU Berlin micro power for mini-copter. *Fuel Cells Bulletin*, 2008(6):1 –, 2008.
- [13] Maamar LATROCH, Omari ABDELHAFID, Heikki KOIVO, Anders LACOUR HARBO. A hybrid radio-vision fault tolerant localization for mini uav flying in swarm. *Przeгляд Elektrotechniczny*, (8):106–110, 2013.
- [14] Figaro Engineering Inc. TGS3820 – for the detection of Alcohol vapors. <http://download.maritex.com.pl/pdfs/se/TGS3820PI0507.pdf>.
- [15] Texas Instrument. 1.2A High Efficient Step Down Converter with Snooze Mode. <http://www.ti.com/lit/ds/symlink/tps62080.pdf>.
- [16] HOPE Microelectronics CO. LTD. Universal ISM band FSK transceiver module RFM12B. <http://www.hoperf.com/upload/rf/RFM12B.pdf>.
- [17] Piotr Batog, Andrzej Wolczowski. Semiconductor gas sensors for mobile robot navigation. *Przeгляд Elektrotechniczny*, (11a):281–184, 2012.

Autorzy: mgr inż. Piotr Batog, piotr.batog@pwr.wroc.pl, dr hab. Andrzej Szczurek, andrzej.szczurek@pwr.wroc.pl, Laboratorium Techniki Sensorowych i Badań Jakości Powietrza Wewnętrznej, Wydział Inżynierii Środowiska, Politechnika Wroclawska, ul. Norwida 4-6, 50-373 Wrocław.



Praca współfinansowana ze środków Unii Europejskiej w ramach Europejskiego Funduszu Społecznego