

# Bezprzewodowy system monitoringu gazowych zanieczyszczeń powietrza

Ryszard Katulski, Jacek Namieśnik, Jacek Stefański, Jarosław Sadowski, Waldemar Wardencki, Michalina Bielawska, Krystyna Szymańska

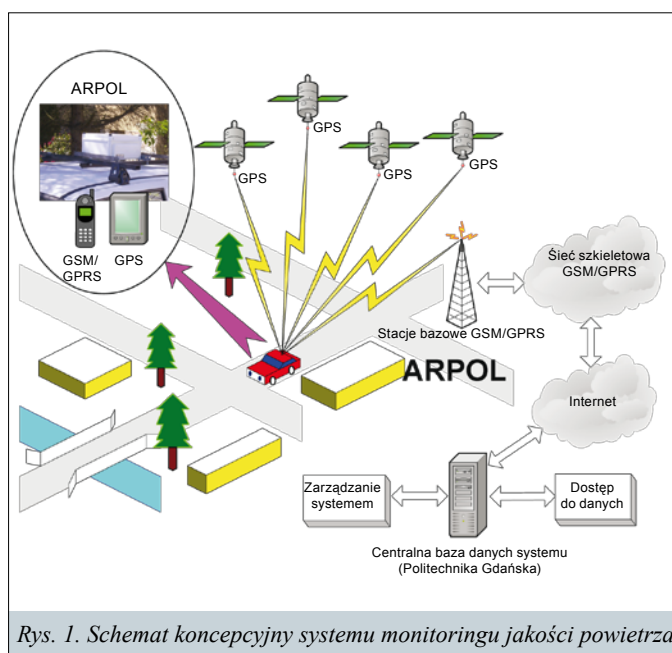
**Istniejące systemy monitorowania zanieczyszczeń gazowych powietrza atmosferycznego, zarówno automatyczne, jak i manualne, zazwyczaj umożliwiają wykonywanie pomiarów wyłącznie stacjonarnych, czyli związane są ściśle z określonym punktem lub przestrzenią w otoczeniu tego punktu. W proponowanym systemie możliwy jest pomiar zanieczyszczeń podczas ruchu stacji pomiarowej, zatem rozwiązanie to nadaje się przede wszystkim (ale nie wyłącznie) do analizy i monitoringu gazowych zanieczyszczeń komunikacyjnych przez pomiar stężeń gazów w strumieniu pojazdów.**

W skład opracowanego systemu monitoringu wchodzi oryginalne urządzenie do pomiarów w ruchu zanieczyszczeń gazowych powietrza atmosferycznego różnymi związkami chemicznymi [1, 2], dalej zwane ARPOL. Urządzenie może być zainstalowane na dowolnym pojeździe ruchomym typu autobus lub taksówka i przekazywać do serwera, pełniącego rolę bazy danych, wyniki pomiarów stężeń ww. substancji w powietrzu wraz z informacją o położeniu i prędkości pojazdu, a także temperaturze i wilgotności powietrza w miejscu pomiaru. Transmisja danych pomiędzy urządzeniem a serwerem odbywa się przy wykorzystaniu modemu radiowego pracującego w systemie GSM/GPRS.

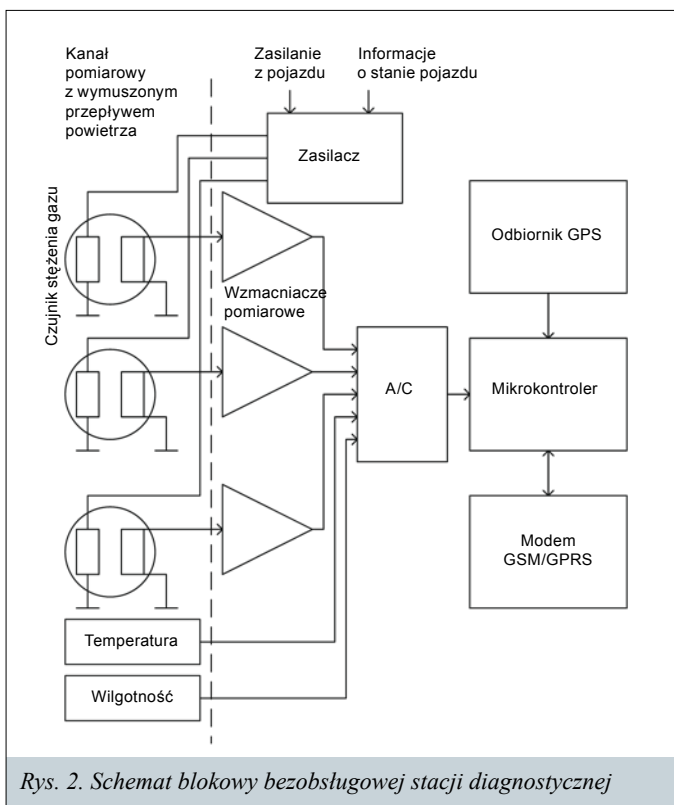
## Struktura systemu

Schemat koncepcyjny systemu monitoringu poziomu wybranych gazów w powietrzu atmosferycznym przedstawiony został na rys. 1 [3, 4]. System ten składa się z mobilnych stacji diagnostycznych (ARPOL), umieszczanych na pojazdach lub lokalizowanych w stałych miejscach, w których istotne jest określenie stężenia zanieczyszczeń gazowych. Mierzone przez stacje monitorujące wartości sygnałów z czujników stężeń związków chemicznych wraz z informacjami uzupełniającymi, jak: pozycja geograficzna, prędkość poruszania się stacji, temperatura i wilgotność powietrza, zostają przesyłane drogą radiową poprzez infrastrukturę sieci komórkowej GSM/GPRS oraz sieć Internet do serwera z bazą danych zlokalizowanego w dowolnym miejscu, np. w Politechnice Gdańskiej. Serwer przelicza elektryczne sygnały z czujników na stężenia gazów zgodnie z indywidualnymi równaniami, ustalonymi oddzielnie dla każdego egzemplarza stacji diagnostycznej w procedurze kalibracyjnej. Otrzymane wartości stężeń podlegają ocenie i weryfikacji pod kątem ich wiarygodności. Zatwierdzone dane mogą być udostępniane zainteresowanym osobom i instytucjom w różnej formie, np. wyświetlane w postaci stron www czy eksportowane do plików w celu dalszej obróbki specjalistycznym oprogramowaniem.

**Streszczenie:** Artykuł zawiera opis budowy oraz możliwości systemu do pomiaru zanieczyszczeń gazowych powietrza atmosferycznego. Przedstawione zostały wymagania funkcjonalne, jakie postawiono mobilnej stacji diagnostycznej, oraz konstrukcja samej stacji. Zaprezentowano także przykładowe wyniki pomiarów wraz z opisem zastosowania systemu oraz możliwego sposobu obróbki i wykorzystania otrzymywanych w ten sposób danych.



Dla zapewnienia prostoty działania systemu monitoringu proces konfiguracji stacji ARPOL oraz serwera ograniczono do minimum. Funkcjonowanie poszczególnych stacji monitorujących jest całkowicie niezależne, zatem rozbudowa systemu o nowe stałe punkty monitoringu lub nowe stacje mobilne wymaga tylko włączenia i prawidłowego skonfigurowania urządzeń pomiarowych. Nie ma również dużych wymagań dotyczących maksymalnej pojemności dysków serwera bazy danych: przy rejestracji danych co 10 sekund pojedyncze urządzenie pomiarowe generuje około 300 MB danych rocznie.



Rys. 2. Schemat blokowy bezobsługowej stacji diagnostycznej

reklama

## Mobilna stacja diagnostyczna ARPOL

Prototypowe egzemplarze stacji diagnostycznych ARPOL zostały zbudowane w laboratorium Katedry Systemów i Sieci Radiokomunikacyjnych Politechniki Gdańskiej, zaś metoda pomiarowa i zestaw użytych czujników stężenia gazów w powietrzu zostały wytypowane przez pracowników Wydziału Chemicznego Politechniki Gdańskiej oraz Fundacji ARMAAG (Agencja Regionalnego Monitoringu Atmosfery Aglomeracji Gdańskiej). Konstrukcja mobilnej stacji diagnostycznej została podporządkowana wymogom tych czujników oraz przewidywanemu zastosowaniu.

Urządzenie pomiarowe zawiera oryginalny układ elektroniczny pełniący funkcję rejestratora zadanych wielkości mierzonych, współpracujący m.in. z radiowym terminalem transmisji danych (w standardzie GSM/GPRS), za pośrednictwem którego informacje o wartościach stężeń substancji chemicznych są przesyłane poprzez sieć Internet na serwer. Opracowany układ stanowi niezależną jednostkę ruchomą montowaną na pojazdach, służącą do pomiaru stężenia podstawowych związków chemicznych emitowanych przez ruch uliczny oraz instalacje przemysłowe, tj. dwutlenku azotu ( $\text{NO}_2$ ), tlenków azotu ( $\text{NO}_x$ ), benzenu ( $\text{C}_6\text{H}_6$ ), ozonu ( $\text{O}_3$ ), tlenku ( $\text{CO}$ ) i dwutlenku węgla ( $\text{CO}_2$ ). Pomiar stężeń takiego zestawu gazów w powietrzu atmosferycznym zwiększa możliwości pomiarowe istniejącej sieci stałych stacji monitorujących na terenie trójmiasta, zaś mobilność i powiązanie wyników z geograficznymi koordynatami punktów pomiarów wprowadza nową jakość do tematyki monitoringu jakości powietrza. Istnieje możliwość zwiększenia liczby zainstalowanych czujników czy dostosowania zestawu monitorowanych gazów do wymogów nabywcy systemu. Schemat blokowy stacji diagnostycznej przedstawiono na rys. 2.

Najistotniejszym elementem stacji monitorującej jest zestaw czujników, reagujących na zmianę stężenia mierzonych gazów w powietrzu przez zmianę określonej wielkości elektrycznej,

najczęściej: rezystancji lub siły elektromotorycznej. Pierwsza wersja urządzenia pomiarowego, wykonanego w ramach prac nad systemem, oparta była na fabrycznym zestawie czujników z przetwornikami A/C oraz mikrokontrolerem przeliczającym wielkości elektryczne na odpowiadające im wartości stężeń gazów. Zestaw ten uzupełniony został o moduł komunikacyjny łączący wyniki pomiarów z danymi z odbiornika GPS i wysyłający je na serwer poprzez łącze GSM/GPRS oraz niezbędne obwody zasilania i interfejsów. Pozytywne wyniki testów oraz potwierdzona w praktyce przydatność urządzenia zachęciły autorów do skonstruowania drugiej wersji stacji monitorującej, rozbudowanej pod względem funkcjonalnym o:

- większą liczbę czujników stężeń gazów w powietrzu;
- specjalną konstrukcję mechaniczną obudowy urządzenia, zawierającej tunel z wymuszonym stabilnym przepływem powietrza dla zwiększenia powtarzalności wyników;
- uniwersalny układ zasilania pozwalający na zasilanie urządzenia z instalacji pojazdów o napięciu 12 V (samochody osobowe) i 24 V (autobusy, ciężarówki) oraz na podtrzymanie pracy urządzenia przez kilka godzin poprzez zasilanie z wbudowanego akumulatora;
- odseparowanie galwaniczne układu pomiarowego od instalacji elektrycznej zasilającej urządzenie;
- przystosowanie układu do pracy w ujemnych temperaturach przez oddzielenie czujników stężeń gazów od elektroniki wymagającej dodatniej temperatury oraz zastosowanie podgrzewania części komunikacyjnej stacji monitorującej przy niskich temperaturach otoczenia.

Grubowarstwowe czujniki półprzewodnikowe, zastosowane do pomiarów związków chemicznych zanieczyszczających powietrze, są urządzeniami najnowszej generacji wykonanymi z nanostruktur o uziarnieniu od 30 do 50 nm. Czujniki te są utrzymywane w temperaturze od 200 do 400°C poprzez podgrzewanie ich miniaturowymi grzałkami stanowiącymi podłoże struktur półprzewodnikowych. Elektryczna odpowiedź czujników jest proporcjonalna do stężenia określonego gazu w badanym powietrzu. Czujniki takie są projektowane do wykrywania i pomiaru stężeń gazów na poziomie  $\text{mg}/\text{m}^3$  (ppm), z punktu widzenia ochrony środowiska wymagany jest jednak pomiar znacznie mniejszych stężeń na poziomie  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  (ppb), istotne było zatem rozwiązanie problemu niestabilności wyników przy niskich stężeniach poprzez cyfrową obróbkę rejestrowanych wartości. Czas pomiędzy rejestracją wartości pomierzonych przez czujniki może być konfigurowany od pojedynczych sekund przy pomiarach mobilnych do minut przy pomiarach



Rys. 3. Przykład montażu ARPOL-u na dachu samochodu

stacjonarnych. Przy typowym interwale czasu rejestracji wynoszącym 10 sekund, w ciągu doby (przy założeniu nieprzerwanej pracy stacji monitorującej) gromadzonych jest ponad 8500 zestawów danych o stężeniach mierzonych gazów, temperaturze i wilgotności powietrza, pozycji geograficznej i prędkości poruszania się stacji oraz ewentualnie o parametrach zasilania i stanie uruchomienia pojazdu, na którym stacja monitorująca może być zainstalowana. Przykład montażu ARPOL-u na dachu samochodu Fundacji ARMAAG przedstawia rys. 3.

Eksploatacja stacji monitorującej podczas pomiarów w większości przypadków nie wymaga żadnej obsługi. Prawidłowo skonfigurowana i skalibrowana stacja może pracować przez kilka miesięcy bez konieczności przeprowadzania jakichkolwiek czynności obsługowych. Informacje o aktualnym stanie pracy urządzenia oraz ewentualnych błędach w funkcjonowaniu najważniejszych podzespołów elektronicznych lub problemach z rejestracją danych pomiarowych są natychmiast przesyłane do upoważnionych osób w wiadomościach tekstowych SMS.

### Ekwiwalentność wyników

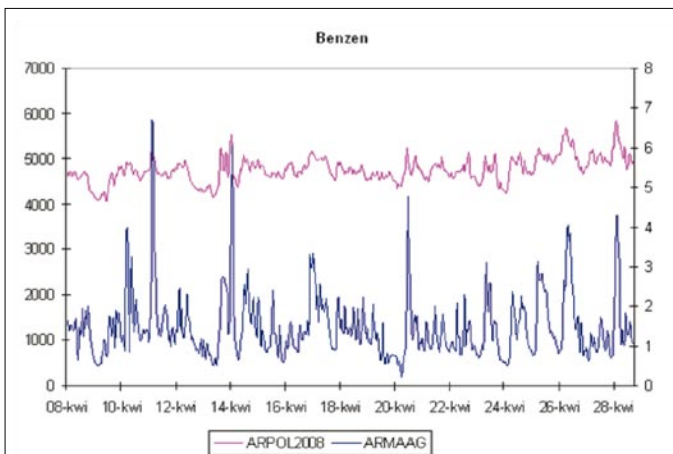
Po zbudowaniu ARPOL-u w pierwszej kolejności zostały przeprowadzone badania ekwiwalentności zastosowanej metody pomiarowej z wynikami referencyjnych analizatorów pochodzących ze stacji automatycznego monitoringu, będących częścią sieci Fundacji Agencji Regionalnego Monitoringu Atmosfery Aglomeracji Gdańskiej.

Analiza wyników pomiarów wykonanych przez ARPOL w czasie kilkunastu dni testowych pozwoliła na określenie zależności skalujących dla zastosowanych czujników pomiarowych. Po wprowadzeniu współczynników korekcyjnych dopasowanie wyników pomiarowych otrzymanych za pomocą ARPOL-u do wyników ze stacji referencyjnych można uznać za zadowalające (błąd średni na poziomie zera). Przykładowe porównanie przebiegów stężeń benzenu przed i po korekcie dla serii pomiarowych ARPOL-u i analizatora referencyjnego sieci Fundacji ARMAAG przedstawiają rys. 4 i 5.

### Wizualizacja przestrzenna danych pomiarowych

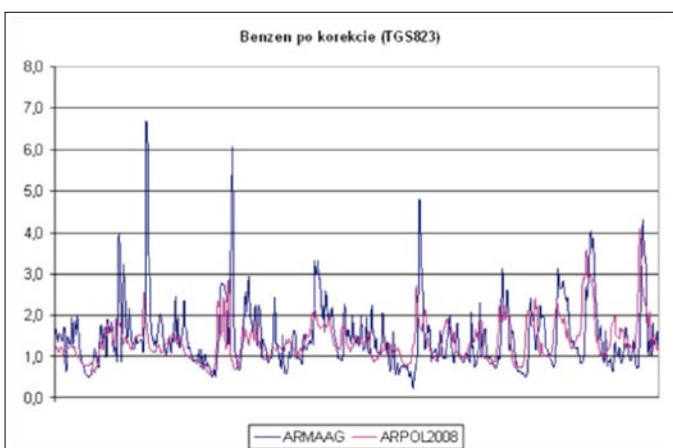
W celu przetestowania działania urządzenia w ruchu wykonano kilka serii pomiarowych wzdłuż ciągów komunikacyjnych. Trasy wszystkich serii pomiarowych wyznaczone zostały na podstawie doświadczeń zespołu wykonującego badania i obejmują różne rodzaje układów komunikacyjnych (rondo, skrzyżowanie, sygnalizacja świetlna), różne rodzaje nawierzchni, różne rodzaje otoczenia (obszar zalesiony, zabudowa miejska, przedmieście, zabudowa przemysłowa). Przykładowe mapy z wynikami tych pomiarów przedstawiono na rys. 6 i 7. Na mapach tych zostały również zaznaczone wzdłuż ciągów komunikacyjnych lokalizacje stacji odniesienia Fundacji ARMAAG. Wartości stężeń związków chemicznych mierzonych przez ARPOL w trakcie trwania kampanii pomiarowych były na bieżąco porównywane z wartościami pochodzącymi ze stacji ARMAAG.

Do opracowania przestrzennego danych wybrano Metodę Odwrotnych Odległości (ang. IDW – *Inverse Distance Weighting*). W metodzie tej wartość zmiennej w punkcie interpolacji jest wyznaczana jako średnia wagowa z otaczających punktów pomiarowych. Metoda ta wykorzystuje zasady przestrzennej autokorelacji. Zakłada, że największy wpływ na wartość szacowanej komórki mają punkty znajdujące się najbliżej,

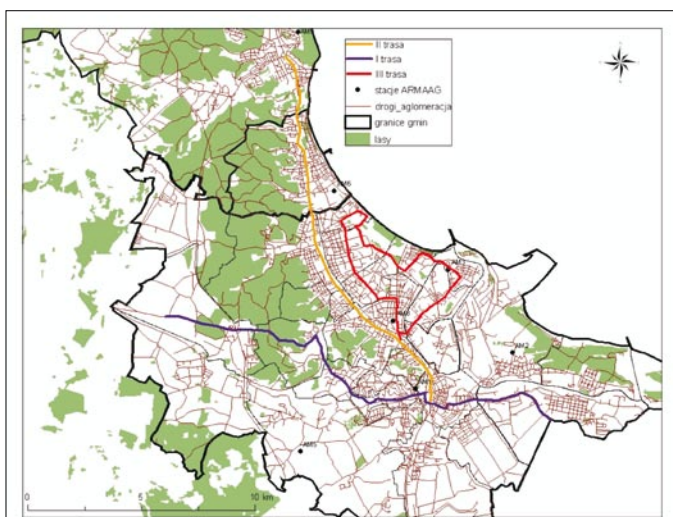


reklama

Rys. 4. Porównanie stężeń benzenu przed wprowadzeniem równania korekcyjnego



Rys. 5. Porównanie stężeń benzenu po wprowadzeniu równania korekcyjnego

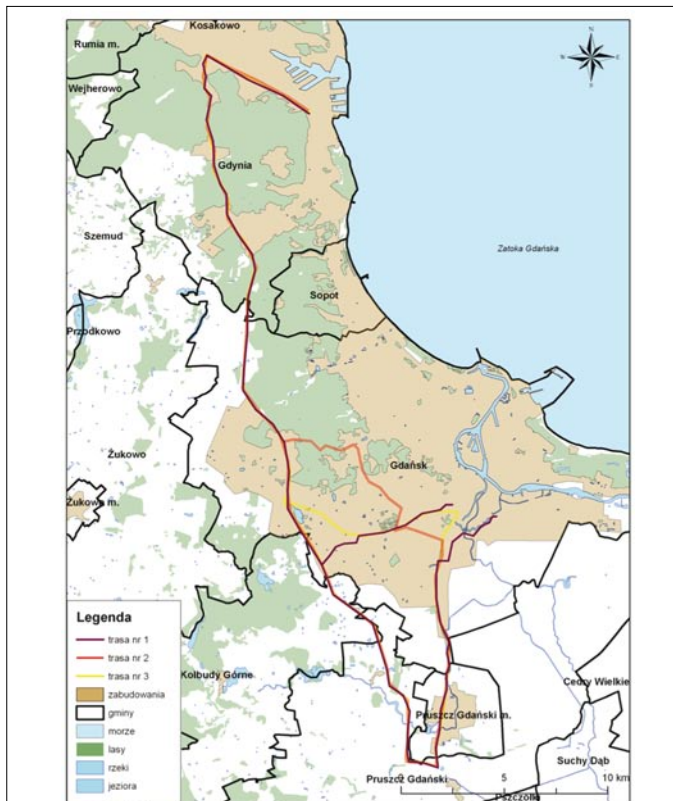


Rys. 6. Trasy pomiarowe w dniach 10–23.05.2007 r. wraz z lokalizacją stacji ARMAAG

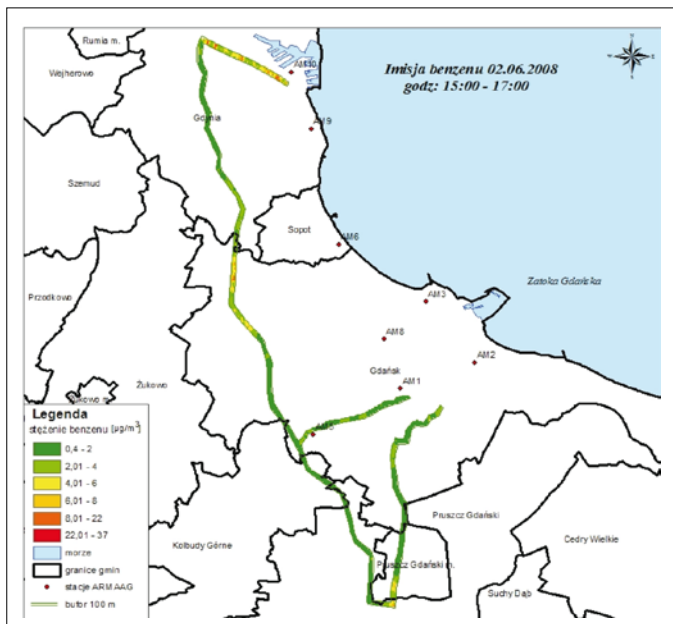
stąd metodę ta określa się jako lokalną. Dzięki temu uzyskiwane rezultaty odzwierciedlają miejscowe zróżnicowanie interpolowanych wartości. Metodę tą wybrano ze względu na charakter danych, czyli bliskie położenie punktów pomiarowych, co pozwoli pokazać lokalne zróżnicowanie stężeń zanieczyszczeń na poszczególnych odcinkach wyznaczonych tras (ronda, skrzyżowania itd.).





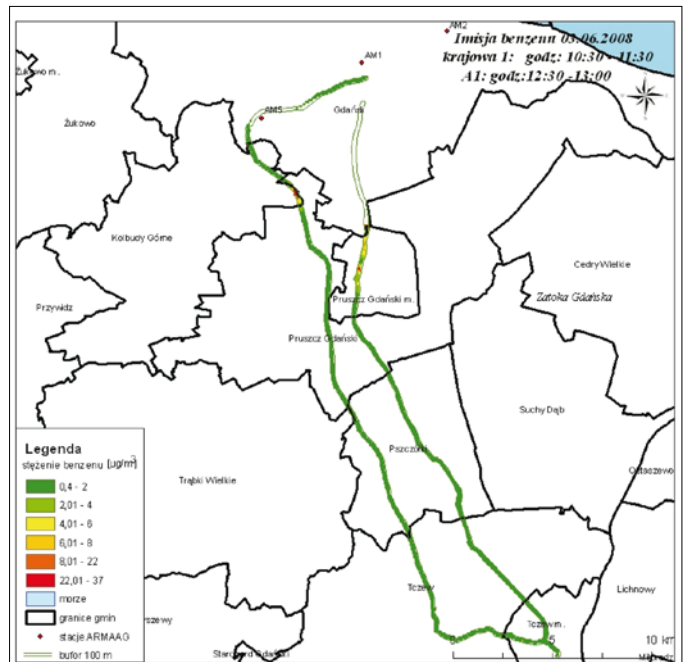


Rys. 7. Trasy wzdłuż Obwodnicy Trójmiasta wraz ze zjazdami (maj/czerwiec 2008 r.)

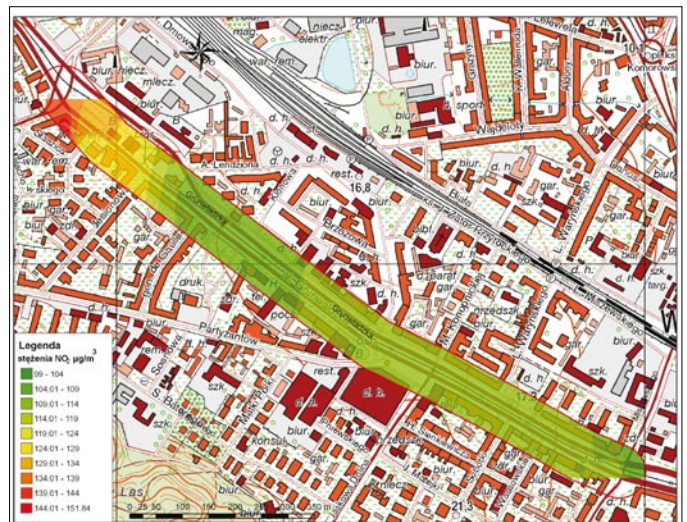


Rys. 8. Imisja benzenu wzdłuż Obwodnicy Trójmiasta – 02.06.2008 r.

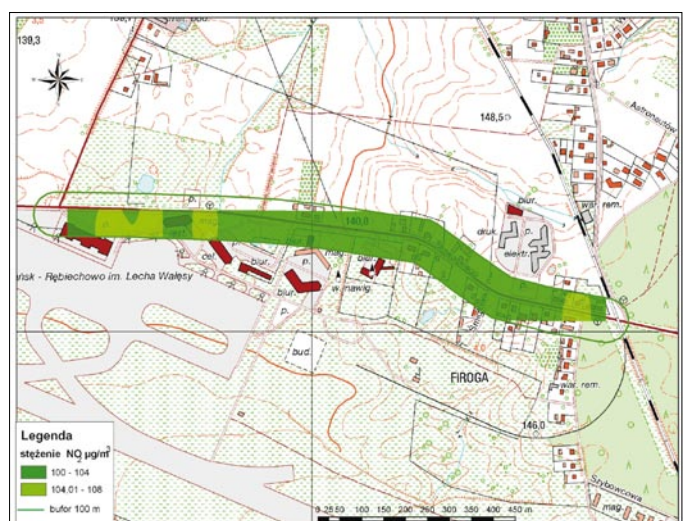
Interpolacji dokonano wewnątrz poligonu o szerokości około 100 m. W opracowaniu do analizy przestrzennej wykorzystano oprogramowanie ArcView 9.2 wraz z nakładką ArcGIS Spatial Analyst. Podstawowym celem analizy jest wskazanie obszarów o największych stężeniach zanieczyszczeń. Do analizy wzięto pod uwagę stężenia ditlenku azotu ( $\text{NO}_2$ ), monotlenku ( $\text{CO}$ ) i ditlenku węgla ( $\text{CO}_2$ ) oraz benzenu ( $\text{C}_6\text{H}_6$ ). Ponadto przeanalizowano w opracowaniu zależność prędkości pojazdu od wartości stężeń. Na podstawie tak wykonanych map można było stwierdzić, jakie są wielkości stężeń na poszczególnych odcin-



Rys. 9. Imisja benzenu wzdłuż drogi krajowej nr 1 i autostrady A1 – 03.06.2008 r.



Rys. 10. Imisja stężeń ditlenku azotu na obszarze o zwartej zabudowie



Rys. 11. Imisja stężeń ditlenku azotu na otwartym terenie

kach tras i jakie jest ich zróżnicowanie oraz określić, czy występuje zależność wysokości stężeń od prędkości pojazdu. Poniżej zaprezentowano przykładowe mapy (rys. 8–11).

Pomiary przeprowadzone wzdłuż wybranych ciągów komunikacyjnych pozwoliły określić orientacyjne wielkości stężeń ditlenku azotu, monotlenku węgla, ditlenku węgla oraz benzeny wzdłuż wyznaczonych tras. Pozwoliły ponadto zidentyfikować miejsca występowania najwyższych stężeń zanieczyszczeń. Stwierdzono występowanie przestrzennej zależności między prędkością samochodu a wartością stężeń na niektórych odcinkach tras.

### Podsumowanie

Opracowano unikalną w skali kraju mobilną jednostkę pomiarową, zwaną ARPOL, do badania zanieczyszczeń powietrza atmosferycznego wzdłuż tras komunikacyjnych. Opracowane urządzenie poddano wnikliwej analizie funkcjonalnej i pomiarowej w warunkach rzeczywistych. W pierwszej kolejności została potwierdzona przydatność zastosowanych czujników do pomiarów zanieczyszczeń w ruchu, poprzez m.in. wykonanie niezbędnych badań ekwiwalentności. Następnie wykonano serie pomiarów mobilnych oraz kilka dobowych serii stacjonarnych wraz z badaniem struktury ruchu. Opracowane urządzenie wchodzi w skład systemu ekspertowego, czym niewątpliwie przyczynia się do poprawy bezpieczeństwa ekologicznego na obszarze działania. ARPOL umożliwia dokładniejsze planowanie środowiskowe, zapewniając poszerzenie bazy pomiarowej o informacje w obszarach źródeł niestacjonarnych. Zgodnie z obowiązującym prawem państwa członkowskie Unii Europejskiej zostały zobowiązane do prowadzenia pomiarów czystości powietrza atmosferycznego oraz podejmowania stosownych środków zaradczych w celu zapewnienia przestrzegania

ustalonych wartości dopuszczalnych zanieczyszczeń. Dla realizacji tego obowiązku państwa członkowskie muszą sporządzać wykazy stref i aglomeracji, na obszarze których występują przypadki przekroczenia norm granicznych, a następnie opracowywać i wprowadzać plany i programy naprawcze. Opracowany mobilny system monitoringu wspomaga zatem istniejący system pomiarów czystości powietrza oraz ułatwia podejmowanie stosownych decyzji poprzez analizę różnych scenariuszy emisyjnych.

### Literatura

- [1] NAMIEŚNIK J., WARDENCKI W.: *Monitoring and analytics of atmospheric air pollution*, Polish Journal of Environmental Studies, vol. 11 no. 3, 2002, pp. 211–218.
- [2] W. WARDENCKI, R. KATULSKI, J. STEFAŃSKI, J. NAMIEŚNIK: *The state of the art. in the field of non-stationary instruments for the determination and monitoring of atmospheric pollutants*, Critical Reviews in Analytical Chemistry, Vol. 38 iss. 4 (2008), s. 259–268.
- [3] R. KATULSKI, J. NAMIEŚNIK, J. SADOWSKI, J. STEFAŃSKI, W. WARDENCKI, K. SZYMAŃSKA: *Mobilny system monitoringu jakości powietrza*, Pomiary Automatyka Kontrola nr 3, s. 126–129, 2008.
- [4] R. KATULSKI, J. NAMIEŚNIK, J. SADOWSKI, J. STEFAŃSKI, K. SZYMAŃSKA, W. WARDENCKI: *Monitoring zanieczyszczeń powietrza atmosferycznego wzdłuż ciągów komunikacyjnych*, Analityka, nr 2, s. 40–42, 2007.
- [5] KATULSKI R. I INNI: *Mobilny System Ekspertowy do badania i analizy zanieczyszczeń*, Raport końcowy z projektu (Nr 3 T09D 100 29), Gdańsk 2008.
- [6] LONGLY P.A., GOODCHILD M.F., MAGUIRE D.J., RHIND D.W.: *GIS Teoria i praktyka*, PWN, Warszawa 2006.

