

Andrzej KOZYRA, Krzysztof SKRZYPCZYK, Łukasz STANGRECKI,  
Łukasz ROBAK, Lucyna SKAPCZYK, Krzysztof STEBEL, Maciej PRZYBYŁA,  
Mateusz OPUCHLIK  
Politechnika Śląska

## **AUTONOMICZNY MOBILNY SYSTEM POMIAROWY DO POMIARÓW FIZYKOCHEMICZNYCH WÓD POWIERZCHNIOWYCH – ROZBUDOWA I TESTY SYSTEMU**

**Streszczenie.** W artykule przedstawiono efekty prac związanych z autonomicznym mobilnym systemem pomiarowym – katamaranem, powstałym w ramach projektów PBL (Project Based Learning) w latach 2014-2016. Głównym celem projektu było zaprojektowanie i implementacja modułu nawigacji pozwalająca katamaranowi na autonomiczne pływanie i przygotowanie go do prac terenowych.

## **AUTONOMOUS MOBILE MEASURING SYSTEM FOR SURFACE WATER CONDITION MEASURING - DEVELOPMENT AND TESTING**

**Summary.** The article presents the results of work related to autonomous mobile measuring system - catamaran, resulting in projects PBL (Project Based Learning) in the years 2014-2016. The main objective of the project was designing and implementing the navigation module allowing the catamaran floating autonomously and prepare it for the fieldwork.

### **1. Wstęp**

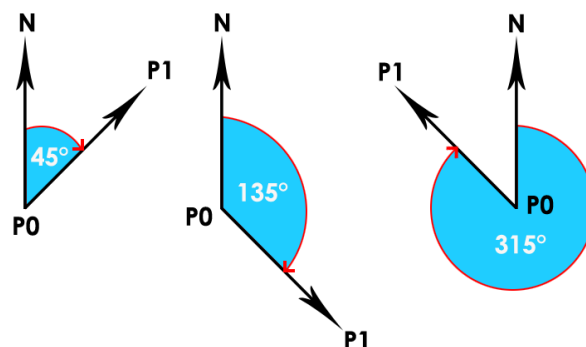
W związku z koniecznością dbania o środowisko, w którym żyjemy pojawiła się potrzeba kontroli jakości wody w zbiornikach powierzchniowych. Aby zbadać możliwie największy obszar wód postanowiono zbudować katamaran, pływający po zbiorniku wodnym i na bieżąco mierzący parametry wody. Pozwala to na zebranie wielu pomiarów, bez czasochłonnych badań w laboratorium. Ponadto wyniki z każdej mierzonej próbki wody mają przypisane współrzędne geograficzne, co umożliwia dokładniejszą analizę i np. znalezienie źródła zanieczyszczeń w wodzie. Zbudowany katamaran jest autonomiczny, tzn. może płynąć po ustawionej trasie i sam dobiera nastawy silników, aby jak najdokładniej trzymać się ustalonej trajektorii. Sterowanie umożliwia wykonywanie programu pomiarów, kalibracji i testów.

### **2. Koncepcja sterowania autonomicznego**

Tryb autonomicznego pływania zaimplementowany został w celu zwiększenia możliwości platformy. Autonomiczność rozumiana jest tutaj, jako programowe

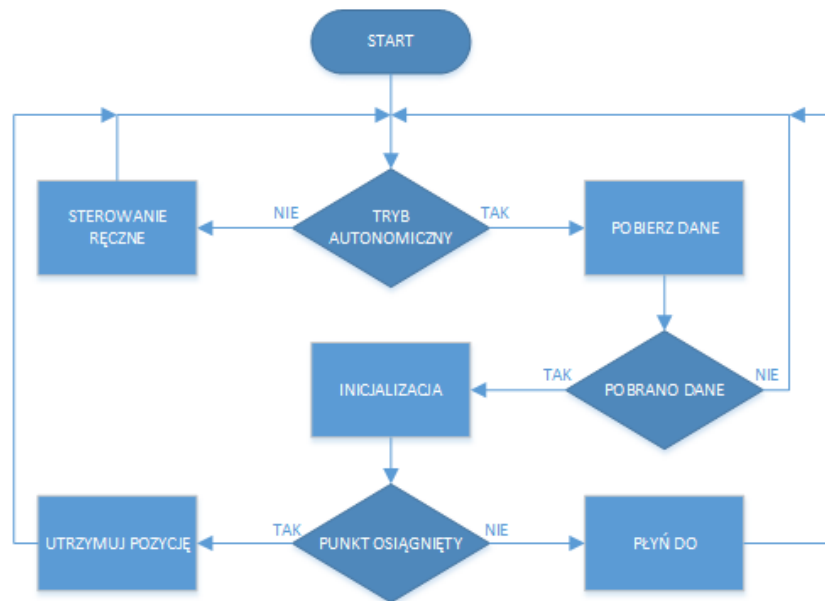
sterowanie silnikami (lewym oraz prawym) tak, aby katamaran płynął w kierunku zadanego punktu zadaną prędkością oraz (w razie potrzeby) utrzymywał zadaną pozycję. Do realizacji pływania po zadanej trajektorii niezbędne jest posiadanie informacji o bieżącej pozycji katamaranu, jego orientacji oraz punkcie w kierunku, którego platforma ma płynąć. Z powodu ograniczeń, jakie wynikają z potrzebnej mocy obliczeniowej do wyznaczania nastaw sygnałów sterujących silnikami jak i faktu, iż moduł główny musi realizować powierzone mu zadania, zdecydowano, iż część odpowiedzialna za autonomiczność została zaimplementowana w oprogramowaniu przeznaczonym na komputer PC. Nastawy silników w trybie autonomicznym aktualizowane są co jedną sekundę, gdyż z takim interwałem aktualizowana jest pozycja przez odbiornik GPS. W celu lepszego zobrazowania sposobu sterowania na rysunku 2 przedstawiono uproszczony schemat blokowy sterowania. Aby przedstawiony schemat był czytelny należy wyjaśnić pojęcia użyte w poszczególnych jego blokach:

- **POBIERZ DANE:** w tym miejscu odbywa się sprawdzenie czy została zadana trajektoria oraz aktualizacja informacji o bieżącej pozycji i orientacji katamaranu  $H$ ;
- **POBRANO DANE:** warunek niezbędny do działania algorytmu sterowania. Jeśli nie otrzymano rozkazu płynięcia do konkretnego punktu lub nie udało się zaktualizować informacji o aktualnej pozycji i orientacji nie są podejmowane dalsze działania;
- **INICJALIZACJA:** wstępne określenie parametrów wejściowych algorytmu sterowania. W tym miejscu odbywa się konwersja współrzędnych geograficznych do lokalnego, kartezjańskiego układu współrzędnych, wyznaczanie parametrów prostej łączącej punkty  $P0$  i  $P1$  oraz jej orientację  $H_{sp}$  (kąt pomiędzy wektorem skierowanym na północ a wektorem wyznaczonym przez punkty  $P0$  i  $P1$  – rysunek 1). Ponadto następuje obliczenie odległości  $D$  katamaranu od punktu docelowego, odległości  $d$  od zadanej trajektorii, obliczenie prędkości liniowej oraz błędu orientacji  $H_{err} = H_{sp} - H$ ;



Rys. 1. Przykład wyznaczania orientacji trajektorii zadanej  $H_{sp}$

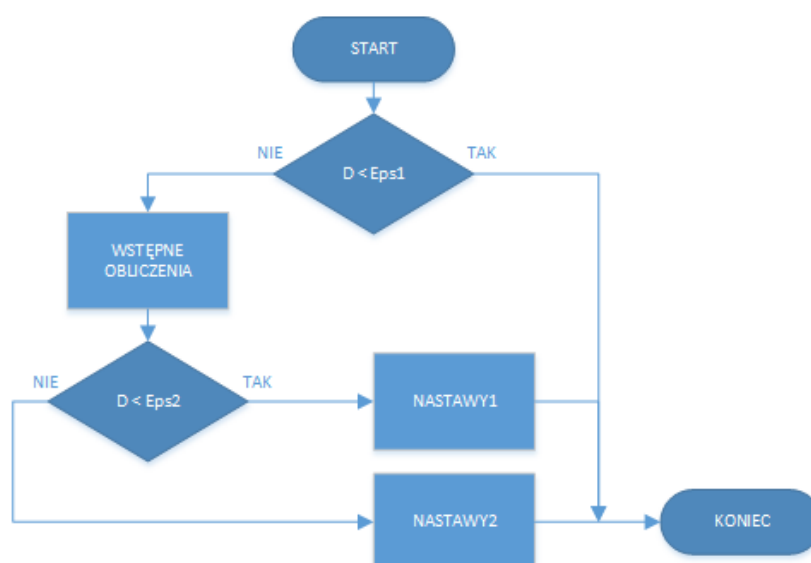
- **PUNKT OSIĄGNIĘTY:** jeśli punkt  $P1$  został już osiągnięty następuje wykonanie algorytmu odpowiedzialnego za utrzymywanie katamaranu w zadanym punkcie – **UTRZYMUJ POZYCJĘ**, w przeciwnym wypadku wykonywany jest algorytm odpowiedzialny za płynięcie wzdłuż zadanej trajektorii – **PŁYŃ DO** [4];



Rys. 2. Uproszczony schemat blokowy sposobu sterowania katamaranem

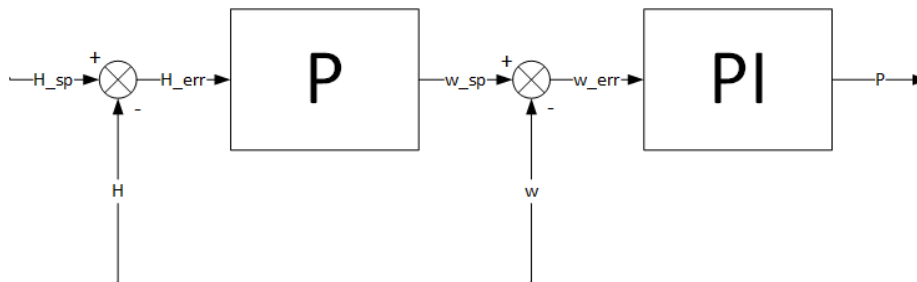
Fragmety odpowiedzialne za utrzymywanie pozycji oraz realizowania trajektorii zadanej przedstawiono na rysunkach 3 i 6. Algorytm utrzymywania pozycji przedstawia się następująco:

- jeżeli odległość katamaranu  $D$  od punktu docelowego  $P1$  jest mniejsza od z góry ustalonej wartości  $Eps1$  nie są podejmowane żadne działania,
- jeżeli odległość katamaranu  $D$  od punktu docelowego  $P1$  jest w zakresie  $(Eps1, Eps2)$  wypracowywane są nastawy –  $NASTAWY1$ , mające na celu wstępne ustawienie orientacji katamaranu tak, by zwrócony był on w kierunku punktu  $P1$ ,
- jeżeli odległość katamaranu od punktu, w którym powinien utrzymywać pozycję zwiększy się powyżej wartości  $Eps2$  wypracowywane są nastawy –  $NASTAWY2$ , mające na celu podплыnięcie w kierunku punktu  $P1$  [4].



Rys. 3. Schemat blokowy algorytmu odpowiedzialnego za utrzymywanie pozycji

Do wyznaczenia nastaw pozwalających na ustawienie orientacji katamaranu w stronę punktu  $PI$  ( $NASTAWY1$ ) wykorzystano regulator kaskadowy, którego strukturę przedstawia rysunek 4. Regulator proporcjonalny wypracowuje na podstawie błędu orientacji  $H_{err}$  wartość zadaną prędkości obrotowej  $w_{sp}$ . Następnie regulator proporcjonalno całkujący na podstawie błędu  $w_{err} = w_{sp} - w$ , gdzie  $w$  – prędkość obrotowa katamaranu, wypracowuje wartość współczynnika  $P$  (współczynnik stopnia wypełnienia sygnału PWM od -100% do 100%). Takie nastawy zapewniają, że katamaran zacznie się obracać w miejscu tak by zwrócić się w kierunku punktu  $PI$  [4].

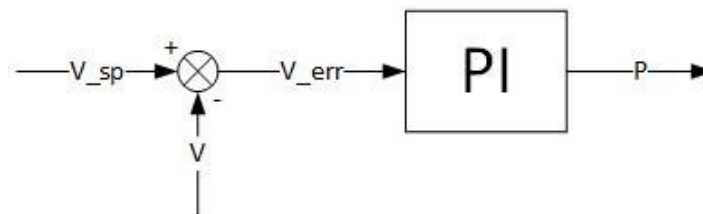


Rys. 4. Struktura regulatora

W przypadku wyznaczania nastaw  $NASTAWY2$  wykorzystywany jest ten sam regulator. Różnica polega na tym, iż w tym wypadku oprócz zmiany orientacji istnieje potrzeba nadania platformie mobilnej prędkości postępowej.

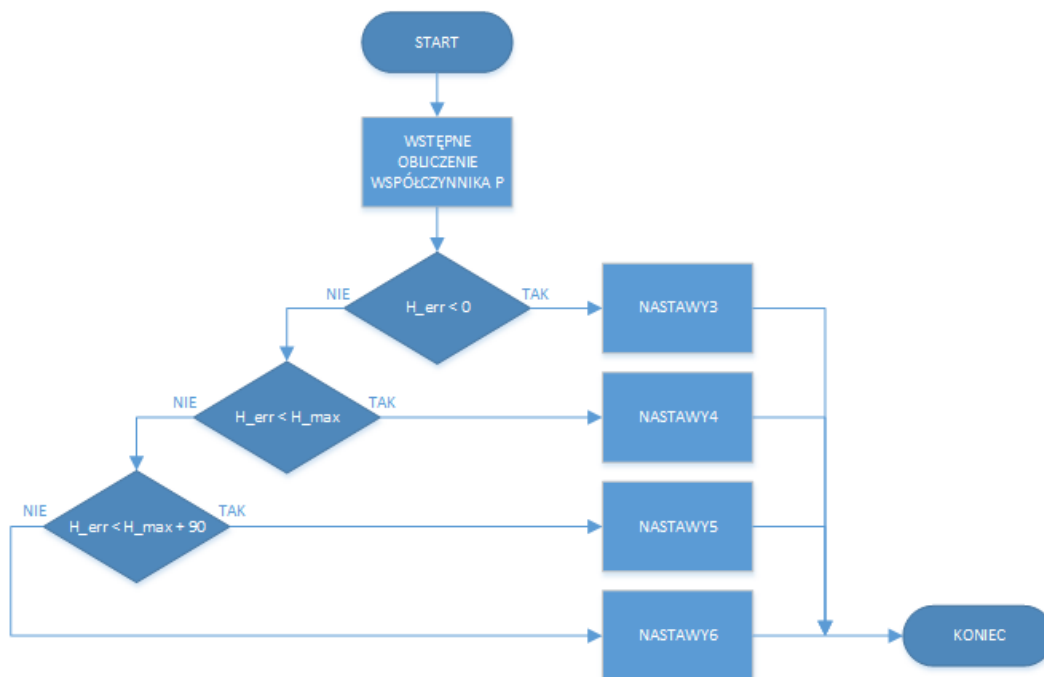
Algorytm płynięcia wzdłuż zadanej trajektorii przedstawia rysunek 6. W celu lepszego zrozumienia idei sterowania poniżej wyjaśnione zostały użyte na schemacie pojęcia i symbole:

- WSTĘPNE OBLICZENIE WSPÓŁCZYNNIKA  $P$ : obliczenie współczynnika mocy  $P$  za pośrednictwem regulatora PI. Regulator ten jest regulatorem prędkości. Jako sygnał wejściowy do regulatora wprowadzany jest uchyb prędkości liniowej katamaranu. Schemat blokowy regulatora przedstawiono na rysunku 5.



Rys. 5. Struktura regulatora prędkości

- jeżeli błąd orientacji katamaranu  $H_{err}$  jest ujemny, tzn. katamaran jest zwrócony w stronę trajektorii wypracowywane są nastawy –  $NASTAWY3$  – mające na celu obrócenie platformy tak, by była zwrócona w stronę zadanej trajektorii,
- jeżeli błąd orientacji  $H_{err}$  mieści się w granicach  $0$  do  $H_{max}$  wypracowane zostają nastawy –  $NASTAWY4$  – mające na celu zbliżenie katamaranu do trajektorii oraz punktu docelowego  $PI$ ,
- jeżeli błąd orientacji  $H_{err}$  jest większy od  $H_{max}$  wypracowane zostają nastawy –  $NASTAWY5$  – mające na celu sprowadzenie błędu orientacji do zakresu od  $0$  do  $H_{ma}$ ,
- jeżeli błąd orientacji  $H_{err}$  jest większy od  $H_{max} + 90^\circ$  wypracowane zostają nastawy –  $NASTAWY6$  – mające na celu sprowadzenie błędu orientacji  $H_{max}$  do zakresu od  $0$  do  $H_{max}$ , w tym wypadku nastawy są bardziej agresywne [4].



Rys. 6. Schemat blokowy algorytmu odpowiedzialnego za płynięcie wzdłuż zadanej trajektorii

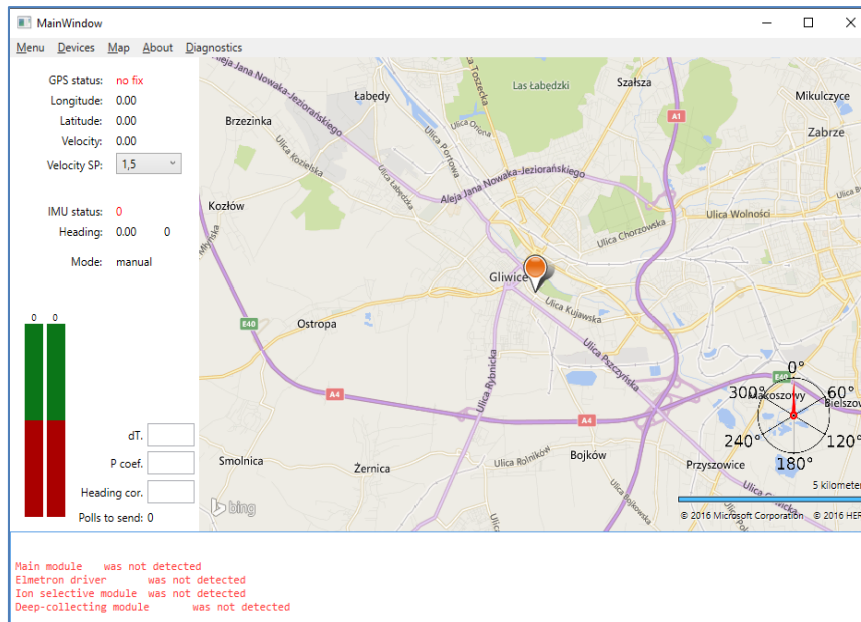
Należy wspomnieć, iż dobór nastaw jest tutaj najważniejszym elementem. W celu poprawnego ich wybrania należy wcześniej przeprowadzić serię testów katamaranu na wodzie, żeby zobaczyć jak różne nastawy mają wpływ na trajektorię, po jakiej porusza się platforma.

### 3. Oprogramowanie PC

Główna aplikacja o nazwie Remote Controller jest aplikacją nadrzędną w systemie, bez której nie jest możliwa praca z mobilną platformą pomiarową. Jest newralgicznym elementem, od którego zależy stabilność i szybkość działania całego systemu. Aplikacja do działania wymaga komputera PC z systemem Windows 7, z biblioteką .NET Framework 4.6, dwóch portów USB, gamepad'a kompatybilnego z biblioteką SharpDX oraz modułu XBee. Okno programu jest przedstawione na rysunku 7.

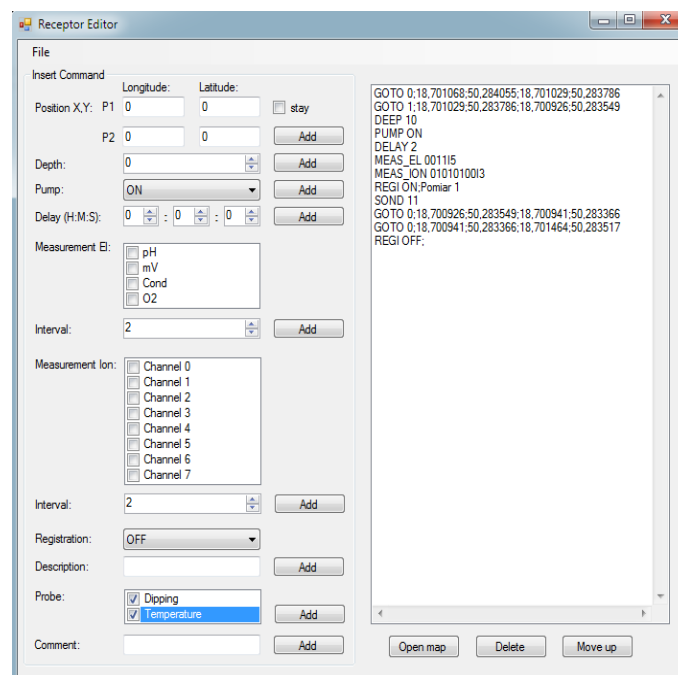
Spośród wielu zadań, jakie wykonuje główny program Remote Controller można wymienić:

- komunikacja poprzez dwa sparowane moduły XBee z modułem głównym,
- sterowanie pracą napędów,
- wizualizacja pozycji oraz orientacji katamaranu na mapie,
- wyznaczanie prędkości liniowej platformy mobilnej,
- obsługa bazy danych, realizacja zapytań w sieci Modbus ASCII inicjowanych przez zewnętrzne aplikacje,
- realizacja autonomiczności, wypracowanie sygnałów sterujących do silników tak, aby osiągnąć wyznaczony cel (tj. zadaną trajektorię ruchu, utrzymywać pozycję) [4].



Rys. 7. Główne okna aplikacji *Remote Controller*

Oprócz głównej aplikacji powstały programy *Receptor Editor* (do tworzenia procedury badań), *ReceptorExe* (do wykonywania tej procedury – wysyła odpowiednie ramki Modbus) i osobne programy do obsługi i monitorowania modułu jonoselektywnego i Elmetronu niepotrzebujące do swojego działania aplikacji głównej.

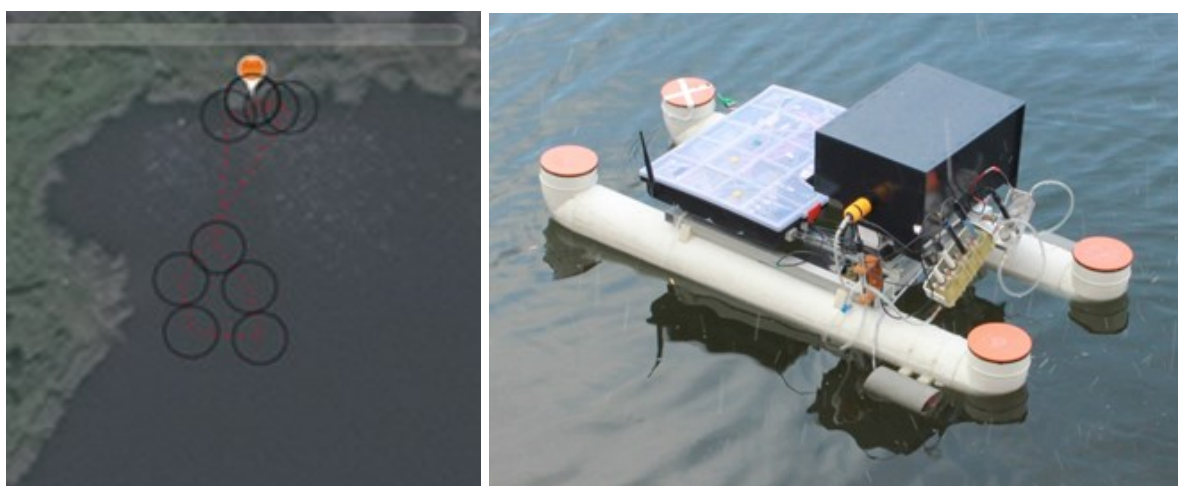


Rys. 8. Główne okna aplikacji *Receptor Editor* z przykładowym planem pomiarów

Aplikacja *ReceptorEditor* służy do ustalania trajektorii, po której ma płynąć katamaran, zadawania głębokości, z której pobierana jest woda do badań, wybierania wartości do mierzenia (pH, stężenie jonów  $\text{NO}_3^-$ ,  $\text{NH}_4^+$  i  $\text{Cl}^-$ , temperatura, tlen, konduktancja i inne zależne od podłączonych elektrod jonoselektywnych), uwzględnia również kalibrację elektrod. Okno aplikacji przedstawiono na rysunku 8.

#### 4. Badania

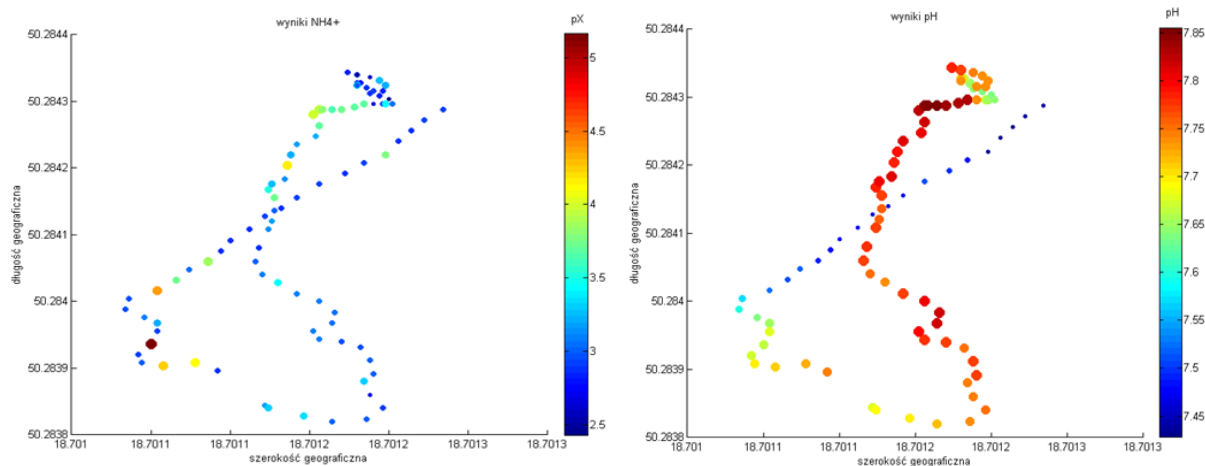
Jednym z celów projektu było zbadanie zbiornika wodnego pod kątem stężenia substancji pozwalających określić stopień zanieczyszczenia zbiornika [2]. Platforma mobilna – katamaran - pozwala na zebranie wielu pomiarów, bez czasochłonnych badań w laboratorium. Jest to bardzo istotne, gdyż większość oznaczeń należy wykonać w ciągu 24h od pobrania próbki [1]. Wykorzystane do pomiarów elektrody jonoselektywne są kalibrowane tylko za pomocą dwóch roztworów [3], co także ułatwia pracę w terenie. Efektem tych działań było otrzymanie serii pomiarowej przedstawiającej rozkład wybranych substancji na powierzchni całego jeziora. Napotkane problemy związane ze sterowaniem, sposobem zbierania pomiarów oraz warunki pogodowe nie pozwoliły na zebranie odpowiedniej ilości danych, które pozwoliłyby na przeprowadzenie prawidłowej analizy. Jednakże uzyskane wyniki są porównywalne z zawartymi w [2] np.  $\text{pH} \approx 7,7$  (nasze) i  $\text{pH} = 8,0$  w [2]. Na rysunku 9 przedstawiono przebieg trajektorii i sam katamaran podczas pomiarów na stawie „Cegielnia”, a na rysunku 10 pomiary stężenia jonów  $\text{NH}_4^+$  i  $\text{pH}$ , zebrane podczas wstępnych testów na stawie „Cegielnia” w dniu 11.02.2016.



Rys. 9. Trajektoria katamaranu i katamaran podczas pomiarów

Wykonano również pomiary wszystkich mierzonych parametrów stacjonarnie w sali laboratoryjnej. Podczas pomiarów zaobserwowano, że pomiary z elektrod jonoselektywnych są stabilne, jednak czas potrzebny do osiągnięcia stanu ustalonego jest bardzo długi. Sugeruje to, że źródłem zakłóceń jest praca silników. Przy kolejnych pomiarach na jeziorze konieczne jest dłuższe wykonywanie pomiarów (pompowanie wody z jeziora, tak, aby elektrody były cały czas zanurzone w wodzie) przed docelowym pływaniem po zadanej trajektorii.

Porównując zadaną trajektorię (rys. 9) i trajektorię zrealizowaną (pomiary na rysunku 10 uwzględniają położenie badanej próbki; położenie przeskalowane w stosunku do rysunku 9) można stwierdzić, że sterowanie autonomiczne działa poprawnie. Niewielkie odchylenia od zadanej trajektorii są spowodowane głównie podmuchami wiatru, na które z racji swej konstrukcji katamaran jest wrażliwy. Algorytm identyfikuje zmianę położenia i koryguje trajektorię.



Rys. 10. Rozkład stężenia jonów  $\text{NH}_4^+$  i pH wody na powierzchni jeziora z dnia 11.02.2016

## 5. Podsumowanie

Podczas trwania projektu zrealizowane zostały następujące zadania: modernizacja istniejących modułów, uporządkowanie i przeprogramowanie układów elektronicznych katamaranu oraz stworzenie nowego oprogramowania, praca badawcza na stawie „Cegielnia”.

Jednym z głównych zadań było nadanie katamaranowi autonomiczności. W tym celu uporządkowano elektronikę i odpowiednio przeprogramowano ją. Na stacje bazową zostały napisane aplikacje umożliwiające łatwą obsługę i sterowanie katamaranem, oraz zapewniające mu pewną autonomiczność.

Dużą częścią projektu była praca badawcza na stawie „Cegielnia”. Były to pomiary parametrów wody, takich jak: pH, konduktancja, temperatura, stężenie tlenu oraz stężenie jonów  $\text{NO}_3^-$ ,  $\text{NH}_4^+$  i  $\text{Cl}^-$ . Badania były prowadzone od 11 lutego do 24 lutego. Zostało zebrane wiele pomiarów wymienionych wielkości.

Podczas trwania projektu została zrealizowana większość z postawionych celów. Dużym wyzwaniem była również praca w grupie: podział obowiązków pomiędzy uczestników projektu, zarządzanie posiadanym budżetem oraz czasem.

## LITERATURA

1. Dojlido J. et al.: Fizyczno-chemiczne badanie wody i ścieków. „Arkady”, Warszawa 1999.
2. Działoszyńska-Wawrzekiewicz M.: Koncepcja przyrodniczo-społecznego wykorzystania zalewisk na przykładzie zlewni rzeki Kłodnicy. Instytut Ekologii Terenów Uprzemysłowionych, Katowice 2007.
3. Kozyra A., Wiora J., Wiora A.: Calibration of potentiometric sensor arrays with a reduced number of standards. *Talanta*, Volume 98, 30 August 2012, p. 28–33.
4. Opuchlik M., Przybyła M., Robak Ł., Skapczyk L., Stangrecki Ł.: Raport z realizacji projektu PBL „Autonomiczny mobilny system pomiarowy do pomiarów fizykochemicznych wód powierzchniowych – rozbudowa i testy systemu. Gliwice 2016.