

Mirosław SOBASZEK¹
Michał MARKIEWICZ²

SYSTEM DO POMIARU PRĘDKOŚCI REGATOWEJ ŁODZI ŻAGLOWEJ

Współczesne żaglowe łodzie regatowe, ze względu na trwający wiele lat postęp techniczny w zakresie budowy jachtów oraz postępującą świadomość załogi w zakresie teorii żeglowania, wyposażone są w szereg mechanizmów służących do regulacji kształtu żagli, ich wzajemnego usytuowania i ustawienia względem kadłuba. Z uwagi na dużą ilość regulacji, które mogą mieć wpływ na prędkość łodzi płynącej określonym kursem do wiatru w pewnych warunkach wiatrowych, dobór optymalnych ustawień żagli staje się rzeczą skomplikowaną i czasochłonną. W związku z czym istnieje realna potrzeba stosowania systemu, który pozwoliłby na pomiar, archiwizację i prezentację w czasie rzeczywistym podstawowych parametrów ruchu łodzi żaglowej. Pozwoliłoby to na szybkie oszacowanie efektywności wprowadzonych zmian w ustawieniu żagli. Obecnie w sprzedaży komercyjnej brakuje rozwiązania za stosunkowo niską cenę, które mogłoby być wykorzystane do oceny parametrów nautycznych małych jachtów żaglowych. Celem artykułu jest zaprezentowanie działania systemu, który w przyszłości ma szansę spełnić te wymagania. Stworzone oprogramowanie umożliwia pomiar prędkości łodzi z użyciem odbiornika GSP oraz pomiar kierunku i prędkości wiatru z wykorzystaniem anemometru kierunkowego. Zebrane dane w module akwizycji, opartym o mikrokontroler, przesyłane są poprzez moduł Bluetooth do tabletu z systemem Android, gdzie na podstawie zebranych danych wykreślone są biegunowe wykresy prędkości łodzi żaglowej w funkcji kierunku i prędkości wiatru. Dzięki czemu możliwe staje się znalezienie optymalnego kąta żegluga oraz efektywnej prędkości jachtu w trakcie żeglowania na wiatr. Ponadto z wykorzystaniem rozmytej interpretowanej sieci Petriego możliwe jest sprawdzanie czy jacht płynie zgodnie z wyznaczonymi parametrami w aktualnie panujących warunkach. Prezentowane rozwiązanie znacząco zmniejsza nakład pracy konieczny do znalezienia optymalnego ustawienia jachtu.

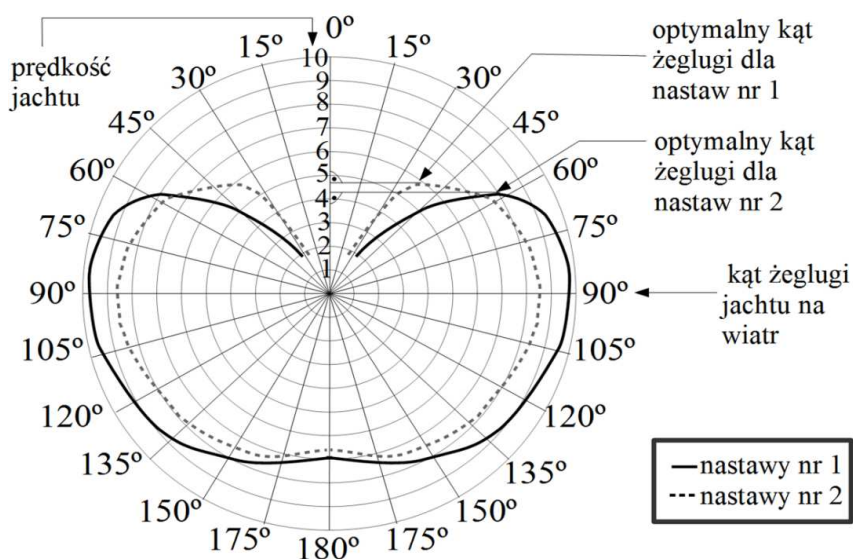
Słowa kluczowe: system pomiarowy, jacht żaglowy, sieci Petriego

¹ Autor do korespondencji: Mirosław Sobaszek, Politechnika Rzeszowska im. Ignacego Łukasiewicza, Wydział Elektrotechniki i Informatyki, Wincentego Pola 2, 35-021 Rzeszów, tel. (17) 86-51-279, email: somirek@prz.edu.pl.

² Michał Markiewicz, Politechnika Rzeszowska im. Ignacego Łukasiewicza, Wydział Elektrotechniki i Informatyki, Wincentego Pola 2, 35-021 Rzeszów, tel. (17) 86-51-536, email: mmarkiewicz@kia.prz.edu.pl.

1. Wprowadzenie do tematyki badań

Jacht żaglowy porusza się na granicy dwóch ośrodków: powietrza i wody, wykorzystując do swojego ruchu ich względną różnicę prędkości. Do podróżowania na styku powietrza i wody wykorzystywane są „skrzydła” zanurzone w tych ośrodkach. Siły nośne powstające wskutek opływu żagla i płetwy mieczowej są wzajemnie tak ustawione, aby ich różnica napędzała jacht w pożądanym kierunku. Celem załogi jachtu regatowego jest jak najefektywniejsze wzajemne ustawienie elementów jachtu oraz dokonanie optymalnych regulacji żagli w danych warunkach wiatrowych. W celu wytworzenia siły nośnej na płetwie mieczowej lub żaglu potrzebny jest pewien kąt zaklinowania napływającego strumienia. Z tego względu jacht nie może płynąć prosto pod wiatr. Konieczne jest tzw. halsowanie, w czasie którego jacht płynie pod pewnym kątem do wiatru, kierując się na prawo lub na lewo od wiatru. Jacht osiąga cel ustawiony pod wiatr poprzez przepłynięcie równej drogi na prawym i lewym halsie. W żegludze pod wiatr prędkość jachtu nie jest jedynym wyznacznikiem jakości ustawień jachtu. Równie ważnym czynnikiem jest kąt pod jakim łódź płynie na prawym lub lewym halsie. Na rys.1 przedstawiono porównanie dwóch ustawień żagli.



Rys.1. Przykładowe wykresy prędkości jachtu w funkcji kąta żeglugi na wiatr dla dwóch ustawień żagli

Fig. 1. Exemplary sailboat speed curves in function of boat angle to the true wind for the two sails settings

Można zauważyć, że ustawienie nr 2 pomimo mniejszych osiągniętych prędkości jest lepsze do żeglugi na wiatr, gdyż pozwala płynąć pod mniejszym kątem, dając w efekcie większą składową wektora prędkości w kierunku pod wiatr [1]. Celem prezentowanego systemu jest zbieranie danych pomiarowych i prezentacja wykresów w sposób ułatwiający analizę efektów różnego ustawienia żagli.

2. Omówienie istniejących rozwiązań dotyczących rozważanego problemu.

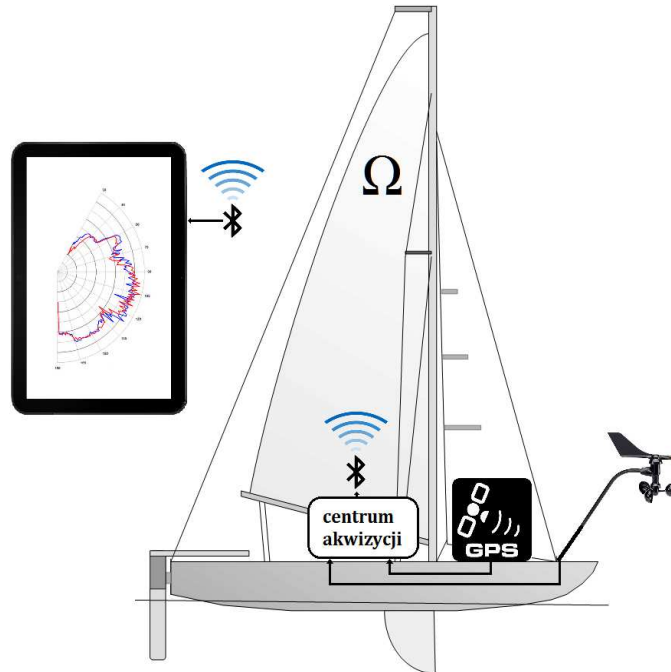
Istnieją nieliczne publikacje naukowe opisujące systemy pomiarowe służące do analizy efektywności i porównania różnych ustawień regatowego jachtu żaglowego. Można zauważyć, że opisane rozwiązania dzielą się na dwa typy – amatorskie oraz profesjonalne. Rozwiązania profesjonalne takie jak opisane w zgłoszeniu patentowym Stevena A. Gedeona [2], są wynikiem pracy dużych zespołów zaangażowanych w prestiżowe regaty np. America's Cup. Systemy te wykorzystują bardzo dużą ilość rozmaitych czujników (do pomiarów naprężeń, kierunków i prędkości przepływów oraz orientacji jachtu w przestrzeni), których poprawne wykorzystanie wymaga szerokiej wiedzy z wielu dziedzin techniki pomiarowej oraz jest bardzo kosztowne. Systemy amatorskie podobne do rozwiązania Alexandre'a Bergeron'a [3] korzystają z małej liczby czujników, co czyni je praktycznymi w zastosowaniu w małych jachtach regatowych. Układy akwizycji danych tych rozwiązań bazują na połączeniu różnych gotowych podsystemów elektronicznych, których działanie nie jest optymalne w tym zastosowaniu. Wynikiem takiej budowy tych urządzeń są błędy pomiarowe, różnice przesunięcia fazowego dla poszczególnych sygnałów pomiarowych na wyjściu systemu oraz brak lub zbytne uproszczenie oprogramowania do analizy pomiarów – z tego powodu systemy te mają bardzo ograniczone możliwości.

3. Opis systemu użytego w badaniach

System pomiarowy pokazano na rys. 2. Składa się on z centrum akwizycji, które pobiera dane o prędkości i kierunku wiatru pozornego pochodzących z anemometru zainstalowanego na dziobie jachtu oraz dane o rzeczywistej prędkości łodzi z odbiornika GPS. Kierunek i prędkość wiatru rzeczywistego są obliczane na podstawie różnicy wektorów prędkości wiatru pozornego oraz prędkości łodzi.

Na podstawie danych z czujników, które układ akwizycji przesyła do tabletu za pośrednictwem interfejsu Bluetooth, oprogramowanie oblicza rzeczywisty kąt i prędkość wiatru, a następnie archiwizuje zebrane dane.

Zgromadzone informacje pozwalają na stworzenie wykresów prędkości łodzi w funkcji kąta żeglugi na wiatr. Ponadto system pozwala porównać bieżące dane pomiarowe z zapisanymi wcześniej charakterystykami i informują załogę o tym czy jacht płynie optymalnym kursem do wiatru.



Rys. 2. Schemat poglądowy systemu pomiarowego

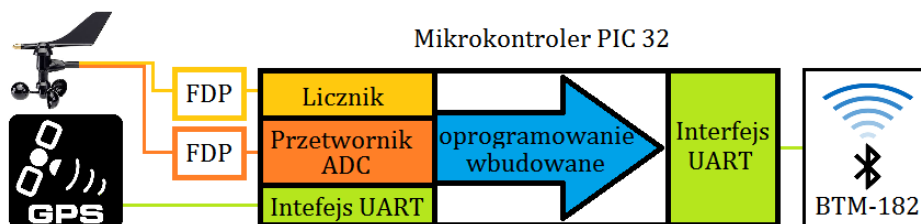
Fig. 2. Schematic diagram of the measurement system

3.1. Moduł akwizycji danych

Schemat blokowy modułu akwizycji danych znajduje się na rys. 3. Do pomiarów prędkości wiatru użyto anemometru czasowego Vantage Pro firmy Davis, który z wykorzystaniem kontraktanu zamienia prędkość obrotową głowicy czasowej na częstotliwość mierzoną następnie w układzie mikrokontrolera. Przyrząd Vantage Pro dostarcza również informacje o kierunku wiatru, zamieniając za pomocą potencjometru położenie wskaźnika kierunku wiatru na napięcie, które następnie jest poddane filtracji i przetwarzaniu analogowo-cyfrowemu w układzie ADC mikrokontrolera.

Dane o rzeczywistej prędkości łodzi żaglowej pobierane są za pośrednictwem interfejsu UART z układu odbiornika GPS zintegrowanego z

antena – ORG1418. Zebrane dane pomiarowe przesyłane są następnie magistralą szeregową do układu transceivera Bluetooth BTM-182.



Rys. 3. Schemat blokowy modułu akwizycji danych

Fig. 3. The block diagram of the data acquisition module

3.2. Opis technologii systemu analizującego dane pomiarowe

System analizujący dane przychodzące z przyrządów pomiarowych jest uruchamiany na tablecie firmy Sony Xperia Z3 z użyciem systemu Android 4.4.4. Aplikacja napisana jest za pomocą środowiska Android Studio przeznaczonego do tworzenia oprogramowania dla platformy Android z wykorzystaniem języka Java. Początkowo uruchamianie i testowanie tworzonej aplikacji było przeprowadzane z użyciem symulatora udostępnionego przez środowisko Android Studio. W kolejnej fazie rozwoju projektu testy przeprowadzono bezpośrednio na tablecie, w którym system miał docelowo działać. Wszystkie dane otrzymane z interfejsu Bluetooth przechowywane są w bazie danych SQLite, która jest domyślnie dostępna dla aplikacji systemu Android i nie wymaga instalowania dodatkowego oprogramowania.

3.3. Opis systemu analizującego dane pomiarowe

Wygląd systemu do rejestracji, analizy i monitorowania danych znajduje się na rys. 4. Składa się on z następujących elementów (oznaczonych na rysunku):

A: nazwa systemu oraz informacja o tym czy urządzenie jest połączone z czujnikami;

B: główne menu programu;

C: sekcja, w której wyświetlana jest krótka informacja opisująca wybraną opcję z menu głównego, w przypadku naciśnięcia przycisku *SHOW LOG* wyświetlane są w tej części interfejsu logi systemowe;

D: część interfejsu, w której są realizowane akcje wybrane z menu.

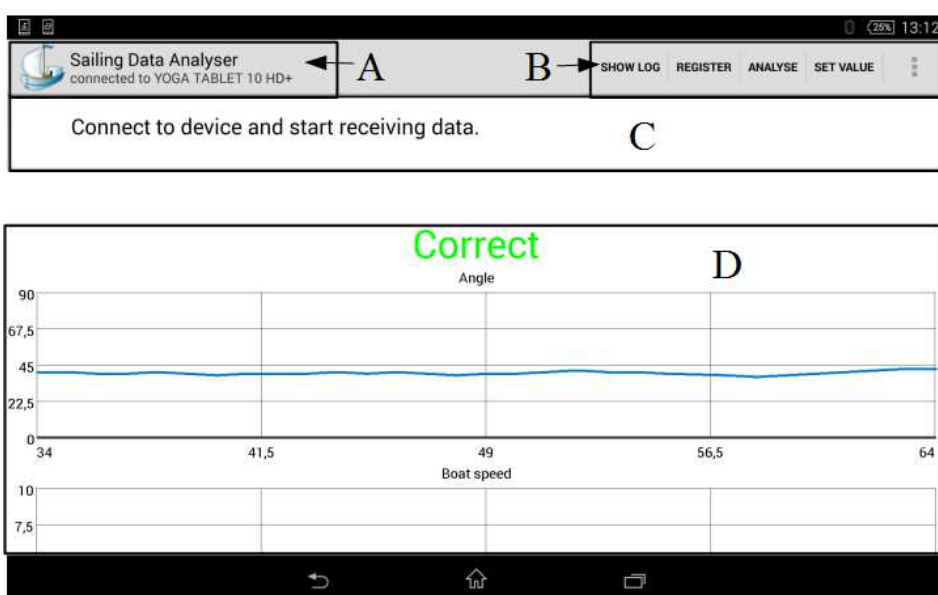
Jak pokazuje rys. 4 menu główne składa się z następujących opcji (pominięto opcję *SHOW LOG*, która została omówiona powyżej):

a) *REGISTER*: służy do nawiązania komunikacji z przyrządami pomiarowymi oraz do rejestracji danych, które są zapisywane w bazie danych oraz wyświetlane na bieżąco na wykresach (ostatnie 30 punktów dla każdej

mierzonej wielkości: kurs jachtu względem wiatru, prędkość jachtu, prędkość wiatru). Jeśli wcześniej ustawiono zadany optymalny kąt żeglugi na wiatr, to w tej akcji będzie sprawdzane, czy jacht płynie zadaniem kursem, w sekcji *D* pojawi się wówczas informacja o poprawności kursu;

b) *ANALYSE*: po wybraniu tej opcji możliwe jest wyświetlanie danych pomiarowych zarejestrowanych w akcji *REGISTER* oraz znalezienie dla nich optymalnego kąta żeglugi jachtu na wiatr. Ze względu na dużą ilość danych pomiarowych, wyświetlenie wszystkich punktów naraz może spowolnić pracę aplikacji, dlatego istnieje możliwość ich filtrowania ze względu na datę zapisu oraz wg prędkości wiatru dla jakiej były zmierzone;

c) *SET VALUE*: służy do ustawienia wartości zadanej kąta żeglugi na wiatr, z którym będą porównywane bieżące dane pomiarowe, otrzymywane w akcji *REGISTER*.



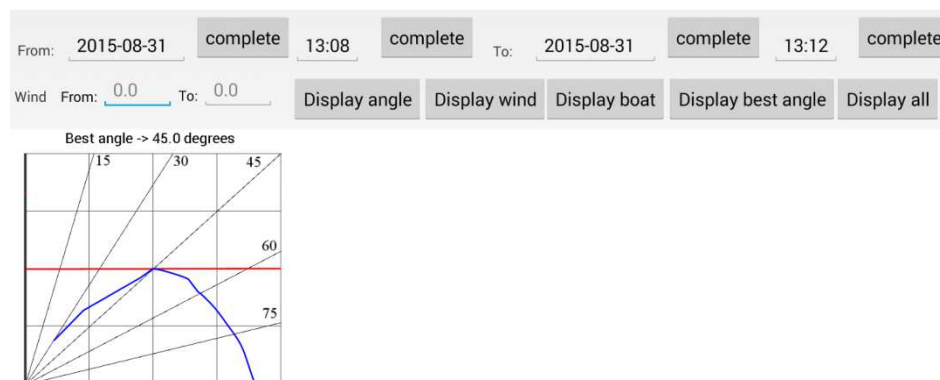
Rys. 4. Widok aplikacji po wybraniu opcji rejestracji danych (*REGISTER*) z głównego menu

Fig. 4. View of the application after option to register data (*REGISTER*) was clicked

3.4. Obliczanie optymalnego kąta żeglugi jachtu na wiatr

Aplikacja do analizy danych pomiarowych jachtu umożliwia sporządzenie wykresów: prędkości jachtu, kąta żeglugi jachtu względem wiatru, prędkości wiatru oraz wykresu biegunowego wyrażającego zależność prędkości jachtu od kąta żeglugi na wiatr.

Na rys. 5 pokazano przykładowy wykres biegunowy narysowany w omawianej aplikacji. Wykres ten można uzyskać dla zadanych parametrów poprzez określenie zakresu czasu, podczas którego pomiary były dokonywane oraz zakresu wiatru, który ma być analizowany, tak aby możliwe było uzyskanie optymalnego kąta żeglugi dla wybranych warunków wiatrowych. Na rys. 5 został pokazany wykres biegunowy prędkości jachtu z zaznaczonym optymalnym kursem jachtu względem wiatru wyznaczonym przez oprogramowanie.



Rys. 5. Widok aplikacji po wyszukaniu optymalnego kąta żeglugi w akcji *ANALYSE*

Fig. 5. View of the application after optimal angle was found in action *ANALYSE*

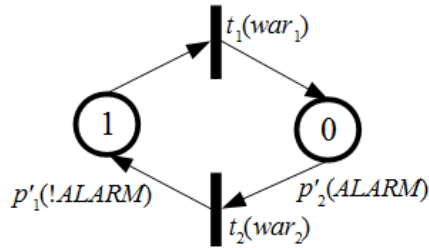
3.5. Diagnozowanie optymalnego kąta żeglugi: sieci Petriego

Aplikacja do analizy danych pomiarowych jachtu umożliwia diagnozowanie optymalnego kąta żeglugi w trakcie rejestracji danych. Dzięki temu sternik na bieżąco może sprawdzić czy płynie optymalnym kursem jachtu względem wiatru. W celu skorzystania z tej funkcji należy wybrać opcję *SET VALUE* i ustawić odpowiednie parametry:

- wartość zadanego kursu jachtu względem wiatru (A_z);
- wartość tolerancji o jaką może się różnić bieżący kurs jachtu od A_z (Δa);
- liczba kolejnych niepoprawnych pomiarów (L_n), po których sternik zostaje poinformowany o błędnym kursie;
- liczba kolejnych poprawnych pomiarów, po których sternik zostaje poinformowany o tym, że płynie zgodnie z zadanym kursem (L_p).

Na podstawie parametrów A_z , Δa , L_n , L_p aplikacja informuje na bieżąco załogę czy jacht płynie zadanym kursem względem wiatru. Do monitorowania optymalnego kursu wykorzystywana jest sieć Petriego, pokazana na rys. 6. Jest to sieć rozmyta interpretowana zaproponowana przez L. Gniewka w [4]. W obecnej postaci systemu wystarczyłoby użyć nierozmytą interpretowaną sieć

Petriego, ale wybór sieci rozmytej jest podyktowany spodziewaną przyszłą rozbudową systemu. Sieć ma dwa miejsca typu p' . Gdy znacznik jest w p'_1 to oznacza to, że jacht płynie poprawnie. Jeśli znacznik jest w p'_2 to oznacza to, że wyświetlany jest błąd.



Rys. 6. Sieć Petriego użyta do wykrywania czy jacht płynie optymalnym kątem do wiatru

Fig. 6. Petri Net used to detect if yacht sail optimal angle to wind

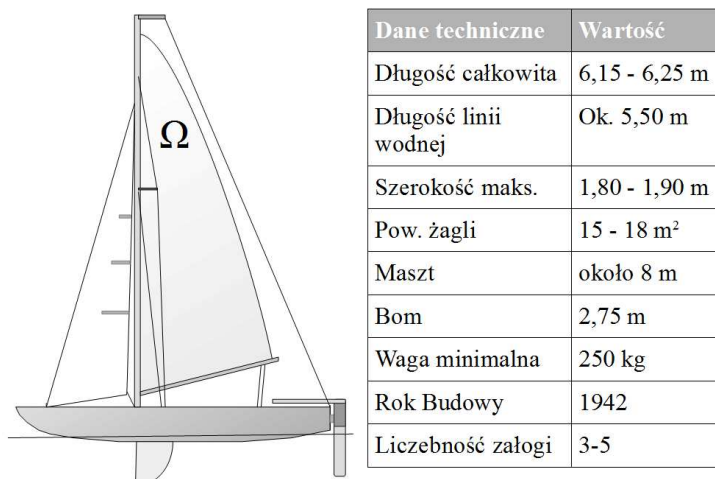
Zgodnie z rys. 6 do uaktywnienia tranzycji t_1 jest wymagane spełnienie warunku war_1 . Warunek ten jest sformułowany w następujący sposób: jeśli w miejscu p'_1 znajduje się znacznik i L_n kolejnych pomiarów jest niepoprawnych czyli: $A_z + \Delta a < a_i$ lub $A_z - \Delta a > a_i$, gdzie $i = 1, 2 \dots L_n$, to warunek war_1 jest spełniony i tranzycja t_1 staje się aktywna. Analogicznie został sformułowany warunek war_2 : jeśli w miejscu p'_2 znajduje się znacznik i jeśli L_p kolejnych pomiarów jest poprawnych czyli $A_z + \Delta a > a_i > A_z - \Delta a$, gdzie $i = 1, 2 \dots L_p$, to war_2 jest spełniony i tranzycja t_2 staje się aktywna.

3.6. Pływające laboratorium

Do badań opisanych w artykule został wykorzystany jacht klasy Omega z zainstalowanym na pokładzie systemem pomiarowym. Wszystkie elementy systemu wraz z tabletem posiadają stopień ochrony IP65. Ta cecha jest szczególnie ważna, ponieważ istnieje ryzyko zamoczenia sprzętu w wyniku opadów deszczu, wysokiej fali na akwenu żegludowym lub wywrócenia się jachtu.

Badany jacht należy do najbardziej popularnej klasy łodzi żaglowych w Polsce. Największa ilość jednostek tej klasy startujących w zawodach, organizowanych na terenie całej Polski, czyni te jachty idealnymi obiektami badawczymi, umożliwiając przeprowadzenie wielu eksperymentów porównawczych ułatwiających weryfikację zdobytej wiedzy.

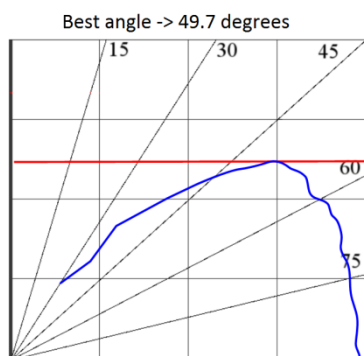
Podstawowe dane techniczne jachtu klasy Omega zostały przedstawione na rys. 7 na podstawie [5, 6].



Rys. 7. Rysunek poglądowy jachtu żaglowego Omega wraz z danymi technicznymi z lewej strony
 Fig. 7. Explanatory figure sailing yacht Omega with technical data in the left

4. Wyników pomiarów

Uzyskane w trakcie sesji pomiarowych dane zostały zaprezentowane na rysunku 8. Ze względu na porywisty wiatr występujący w czasie zbierania danych, pomimo zastosowania filtra uśredniającego ze średnią kroczącą, oprogramowanie z trudnością identyfikowało obszary o niezmiennych wartościach prędkości i kąta wiatru przy jednocześnie stałej prędkości łodzi. Niewielka liczba nieodrzuconych punktów pomiarowych jest przyczyną nierównomiernego przebiegu krzywej prędkości jachtu w funkcji kąta żeglugi na wiatr.



Rys. 8. Wykres uzyskany po przeprowadzeniu badań

Fig. 8. Plot obtained after tests

Wyniki badań pozwalają sądzić, że przy bardziej stałych warunkach wiatrowych możliwe będzie sporządzenie porównawczych wykresów dla różnych ustawień żagli. Pozwoli to poznać wpływ na prędkość i kierunek jachtu do wiatru w zależności od stosowanych konfiguracji i warunków atmosferycznych. Dodatkowo w trakcie żeglugi możliwe było zaobserwowanie jak pewne elementy pracy załogi (rozmieszczenie wzdłużne i poprzeczne poszczególnych jej członków) wpływały na prędkość jachtu żaglowego.

5. Wnioski

Zbudowany system pozwala na zbieranie, archiwizację i analizę danych pomiarowych, umożliwiając ocenę parametrów nautycznych jachtu. Napotkane trudności w trakcie realizacji projektu badawczego wskazują na konieczność przeprowadzenia dalszych pomiarów w celu uzyskania większej liczby wyników dla stałych prędkości i kierunku wiatru oraz skłaniają do poszukiwania efektywniejszego algorytmu filtracji danych pomiarowych. Planuje się wyposażenie systemu w dodatkowy anemometr zlokalizowany na rufie jachtu, tak aby umożliwić dokonywanie precyzyjnych pomiarów prędkości i kierunku wiatru pozornego na kursach z wiatrem. Dodatkowo system warto byłoby wzbogacić w układ inklinometru pozwalający na monitorowanie przechylenia jachtu oraz oceny zafalowania akwenu.

Literatura

- [1] Marchaj Cz.: Teoria żeglowania. Aerodynamika żagla, Alma-Press Sp. z o.o, Warszawa 2000.
- [2] Gedeon S.: Sailboat and crew performance optimization system, US PATENT 6,308,649 B1.
- [3] Bergeron A., Baddour N.: Development of a dynamic variable measurement system for use in wind powered yachts, Proceedings of the 23rd CANCEM.
- [4] Gniewek L.: Sequential control algorithm in the form of fuzzy interpreted Petri net, IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics: Systems, VOL. 43, NO. 2, MARCH 2013, s. 451-459.
- [5] Radwaniecki W.: Historia Klasy Omega, <http://klasaomega.pl/stowarzyszenie/historia/historia-klasy/>, otworzono: 11.08.2015.
- [6] Przepisy Klasy Omega Sport, <http://klasaomega.pl/wp-content/uploads/2013/03/SPORT-2013-2017.pdf>, otworzono: 11.08.2015.

SYSTEM FOR MEASURING SPEED OF RACING SAILBOAT

Summary

Contemporary racing sailboats because of many years of technical progress in the construction of yachts and advancing knowledge of the crew in the theory of sailing, are equipped with a set of mechanisms to control the shape of sails, their mutual positioning and their positioning relative with the hull. Thanks to the large number of regulations that may have an effect on boat speed sailing upwind under certain wind conditions, selection of the optimal settings of sails becomes complicated and time-consuming. Thus, there exists a real need to use system that allow the measurement, archiving and presentations in real time the basic parameters of a moving sailboat. This would allow find a quick estimation of effectiveness of changes made to the sails settings. Currently commercially is lack of a relatively cheap solutions, which could be used to evaluate the nautical parameters of small yachts. The aim of the article is to present the system, which in future could meet these requirements. This system measures the speed of the sailboat using a GPS receiver, as well as wind speed and direction using a directional anemometer. The data collected through acquisition module based on microcontroller is sent via Bluetooth to the Android tablet that on the basis of receiving data allows to draw polar graphs of sailboat speed as a function of wind speed and direction. Hence, it becomes possible to find the optimal angle and the effective speed of the sailboat during sailing upwind. Moreover, software allows to check if yacht sails accordance to designated parameters thanks to the use of Petri nets. This solution significantly reduces the effort required to find the optimal sailboat settings.

Keywords: measurement system, sailboat, Petri nets

DOI: 10.7862/re.2016.4

Tekst złożono w redakcji: styczeń 2016

Przyjęto do druku: marzec 2016