

dr inż. Stanisław Popowski
Instytut Lotnictwa, Warszawa

PROBLEM POMIARU MAŁYCH PRĘDKOŚCI RUCHU OBIEKTU WZGLĘDEM POWIETRZA

W referacie przedstawiono problemy związane z pomiarami małych prędkości względem powietrza. Pomiary te wykorzystywane są w badaniach różnych obiektów latających, jak: śmigłowce, szybowce, motolotnie, poduszkowce oraz obiektów typu UAV. Zaproponowano dwie proste metody pomiaru. Jedna wykorzystuje wielopunktowy pomiar anemometryczny z turbinkami, druga – pomiary za pomocą odbiornika GPS oraz sondy ciśnieniowej. W referacie opisano wykonane próby, które potwierdziły przydatność tych metod do konkretnych zastosowań.

A PROBLEM OF LOW AIRFLOW VELOCITIES MEASUREMENT

In the article some problems of low airflow velocity measurement are presented. These measurements are used in investigations of several flying objects like helicopters, gliders, ultra-light aircraft, hovercraft and UAVs. Two simple measuring methods are proposed. The first one is based on the system of turbine anemometers, while the second one is based on GPS and pressure sensor output signals fusion. Experimental results presented in the paper prove the applicability of discussed methods for substantial projects.

1. WPROWADZENIE

Na obiektach latających niezwykle ważnym zagadnieniem jest pomiar małych prędkości (zarówno składowej pionowej jak i poziomej) względem powietrza [1]. Cechy charakterystyczne lotu, na przykład śmigłowca, to: mała prędkość, możliwość zawisu, możliwość lotu do przodu i do tyłu, ruchy w bok oraz pionowe. Te cechy prowadzą do bardzo trudnych do spełnienia wymagań na układy pomiarowe prędkości.

Klasyczna metoda pomiaru prędkości względem powietrza, przez pomiar ciśnienia dynamicznego:

$$\Delta p = \frac{\rho v^2}{2}, \quad (1)$$

gdzie: ρ – gęstość powietrza, jako różnicy ciśnienia całkowitego p_c i statycznego p , daje poprawne wyniki przy pomiarach prędkości powyżej 50 km/h. Przy pomiarach mniejszych prędkości, ze względu na małe wartości ciśnienia dynamicznego metoda ta nie daje wymaganych dokładności. Przykładowo: zmiana prędkości o 5 km/h w zakresie 15 ÷ 20 km/h powoduje zmianę ciśnienia z 1,1 mm H₂O na 1,9 mm H₂O, a więc o 0,8 mm H₂O. Tak mała zmiana ciśnienia jest bardzo trudno mierzona w wymaganą dokładnością.

Jedną z metod pomiaru tak małych prędkości jest stosowanie zwężek Venturi. Stosując je uzyskujemy dla danej prędkości podciśnienie 3,5-krotnie większe niż ciśnienie przy użyciu rurki spiętrzeniowej, wg zależności (2):

$$\Delta p = \frac{\rho v^2}{2} (n^2 - 1), \quad (2)$$

gdzie: $n = \left(\frac{D}{d}\right)^2$,

D – średnica wlotu dyszy Venturi,

d – średnica gardzieli dyszy Venturi,

$n^2 - 1 = 3,5$: zunifikowana stała konstrukcyjna typowych zwężek.

Aby jeszcze bardziej zwiększyć różnicę ciśnienia stosuje się dysze pomiarowe, w których zamiast ciśnienia statycznego pobiera się ciśnienie całkowite. Wtedy mierzone ciśnienie dynamiczne ma wartość:

$$\Delta p = 3.5 \frac{\rho v^2}{2} + \frac{\rho v^2}{2}, \quad (3)$$

co daje współczynnik dyszy $K = 3,5 + 1 = 4,5$.

Z innych ograniczeń stosowania tradycyjnych metod pomiaru prędkości należy wymienić błędy wynikające z nieosiowego ustawienia elementów pomiarowych (rurek spiętrzeniowych, dyszy Venturi) w strugach przepływającego powietrza. Ma to właściwie miejsce podczas każdego pomiaru z uwagi na kąt znoszenia, a w przypadku śmigłowca, z uwagi na wpływ prędkości indukowanej. Bardzo wrażliwy na nieosiowy przepływ jest pomiar ciśnienia statycznego. Aby się uniezależnić od nieosiowego ustawienia sondy pomiarowej często na śmigłowcach stosuje się ruchomą sondę ciśnieniową, która jest zaopatrzona w powierzchnie sterowe. Sonda taka pod wpływem przepływu powietrza ustawia się zawsze zgodnie z kierunkiem przepływu. Kąty ustawienia sondy są również mierzone i dzięki temu pilot uzyskuje informację o kierunku napływu powietrza oraz jego prędkości. Dodatkowo układ zaopatrzonej jest w czujnik temperatury. Zastosowanie rurki Prandtla zamiast zwężki Venturi wymaga zastosowania czujnika ciśnienia dużej dokładności.

Z powyższych rozważań wynika, że przy pomiarze małych prędkości względem powietrza należy oprzeć się na innych metodach pomiarowych, które mogłyby zapewnić pomiar bez względu na kierunek lotu. Szczególnie ważne są pomiary małych prędkości lotu, bliskich zera. Z metod, które mogą znaleźć tu zastosowanie należy wymienić:

1. metody ciśnieniowe – oparte na pomiarze małych ciśnień:
 - a. metoda oparta na rurce Prandtla,
 - b. metoda oparta na zwężce Venturi,
 - c. metody wykorzystujące pomiary z nadmuchem powietrza,
2. metody anemometryczne:
 - a. metody anemometryczne z turbinkami,
 - b. metody anemometryczne z wirującymi zwężkami Venturi,
3. metody termoanemometryczne – wykorzystującą zmianę oporności drutu pomiarowego w zależności od prędkości ośrodka:
 - a. metody ze stałą temperaturą elementu grzejjego,
 - b. metody ze stałym prądem zasilania,
 - c. metody ze stałą mocą doprowadzoną,
4. metody wirowe – zliczanie wirów generowanych przy opływie ciała,

5. metoda dopplerowska (radiowa – prędkość podróżna, względem ziemi),
6. metody inercjalne (pomiaru względem ziemi),
7. metoda oparta na pomiarach GPS (pomiaru względem ziemi) [2],
8. metody optyczne,
9. metody ultradźwiękowe.

Nie wszystkie wymienione powyżej metody umożliwiają pomiary względem powietrza. Ale jak będzie pokazane w dalszej części artykułu, pomiary takie również mogą stanowić część składową systemu do pomiaru prędkości względem powietrza. Z punktu widzenia bezpieczeństwa lotu ważna jest prędkość względem powietrza (np. określenie stref H-V na śmigłowcu [3]).

Metoda dopplerowska, inercjalna, ultradźwiękowa i optyczna mają ograniczone zastosowanie. Metoda dopplerowska bardzo kłopotliwa z racji pomiaru prędkości względem ziemi i stosunkowo drogiej aparatury. Podobnie metoda inercjalna i optyczna. Metoda optyczna, laserowa stosowana powszechnie w stanowiskach pomiarowych tuneli aerodynamicznych jest trudna w zastosowaniu w badaniach w locie. Metoda ultradźwiękowa, z pozoru prosta, jest bardzo podatna na zakłócenia. Z ww. metod, metoda inercjalna ma jeszcze szansę na zastosowanie, ale przy ścisłej integracji z odbiornikiem GPS. Na uwagę zasługują metody anemometryczne. W zastosowaniach związanych z bezpieczeństwem (np. badaniach zjawiska pierścienia wirowego na śmigłowcu) i sterowaniem istotna jest prędkość względem powietrza mierzona na bieżąco. W przypadku innych pomiarów może się okazać, że wystarczy precyzyjny pomiar względem ziemi uzupełniony uśrednioną prędkością wiatru. Rozwiązania przedstawione poniżej dotyczą obu przypadków

2. WYBRANE UKŁADY POMIAROWE

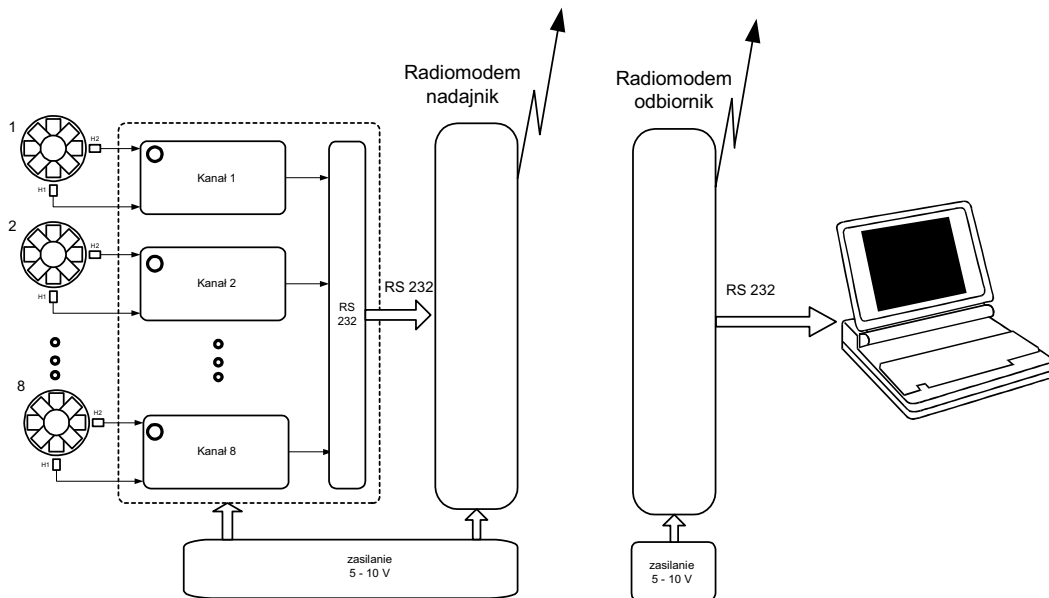
Na podstawie wykonanego przeglądu metod pomiaru małych prędkości dokonano wyboru metody pomiaru prędkości względem powietrza, która może być zastosowana do oceny bezpieczeństwa lotu śmigłowca. Wybrano metodę bezpośrednią, anemometryczną z turbinkami. Nowością, którą tu wprowadzono jest pomiar wielopunktowy, co umożliwia ocenę wartości średniej i zakłóceń. Za wyborem tych metod przemawia proste rozwiązanie, dostępność elementów potrzebnych do wykonania takiego przyrządu oraz oczekiwane własności metrologiczne jak zakres pomiarowy i dokładność. Drugą metodę, którą wybrano do zastosowania na małym samolocie bezzałogowym jest pomiar za pomocą odbiornika GPS uzupełniony przez wartość uśrednioną parametrów wiatru, w pewnym przedziale czasu. Parametry wiatru wyznaczone są przez porównanie prędkości podróżnej i przyrządowej przy dużych zmianach kąta drogi.

2.1. Metodę anemometryczną z turbinkami

Ten układ pomiarowy został przygotowany do zastosowania na śmigłowcu do oceny bezpieczeństwa lotu. Z analizy zjawiska powstawania pierścienia wirowego określono niezbędny zakres pomiarowy prędkości, który powinien wynosić ± 10 m/s, oraz dokładność pomiaru, ok. 0,2 m/s.

Na rys. 1 przedstawiono schemat ideowy zaproponowanego systemu. Z lewej strony umieszczone są czujniki pomiarowe, od jednej do ośmiu turbin anemometrów. Z każdą osią turbinki związany jest magnes trwały, który podczas obrotu turbinki generuje zmienne pole magnetyczne. W polu tym umieszczone są dwa halotrony (dla każdej turbinki). Halotrony generują sygnały elektryczne o częstotliwości odpowiadającej prędkości obrotowej turbinki. Dwa

halotrony przemieszczone względem siebie umożliwiają również określenie kierunku obrotów, tym samym znak mierzonej prędkości względem powietrza.



Rys. 1. Schemat struktury systemu anemometrycznego z turbinkami

Układ pomiarowy mierzy w każdym kanale częstotliwość sygnałów otrzymanych z halotronów, dodaje znak prędkości oraz tworzy zbiór danych ze wszystkich turbin, który cyklicznie (co 0,1 s) jest w standardzie RS-232 dostępny na wyjściu układu. Tu następuje przekazanie danych do radiomodemu nadajnika, który nadaje przekazane informacje drogą radiową. W radiomodemu odbiorniku dane zostają odebrane i również w standardzie RS-232 przekazane do wskaźnika pilota oraz komputera klasy PC w celu ich archiwizacji. Konstrukcję mechaniczną czujnika (turbinki) oparto na fabrycznym podzespolu, turbince, która jest wykorzystana w dostępnych na rynku anemometrach. Na rys. 2 przedstawiono opisaną turbinkę w uchwytach, umożliwiających zamocowanie jej w różny sposób. Przedstawione w systemie łącze radiowe jest opcją, z której można zrezygnować.



Rys. 2. Turbinki anemometrów zamocowane w oprawkach różniących się kątem zamocowania (0 deg i 90 deg)

Wykonane uchwyty czujników umożliwiają pomiar w różnych konfiguracjach. Na rys. 3 przedstawiono konfigurację do pomiaru składowych i pełnego wektora prędkości względem powietrza, a na rys. 4 konfigurację do pomiaru profilu przepływu.



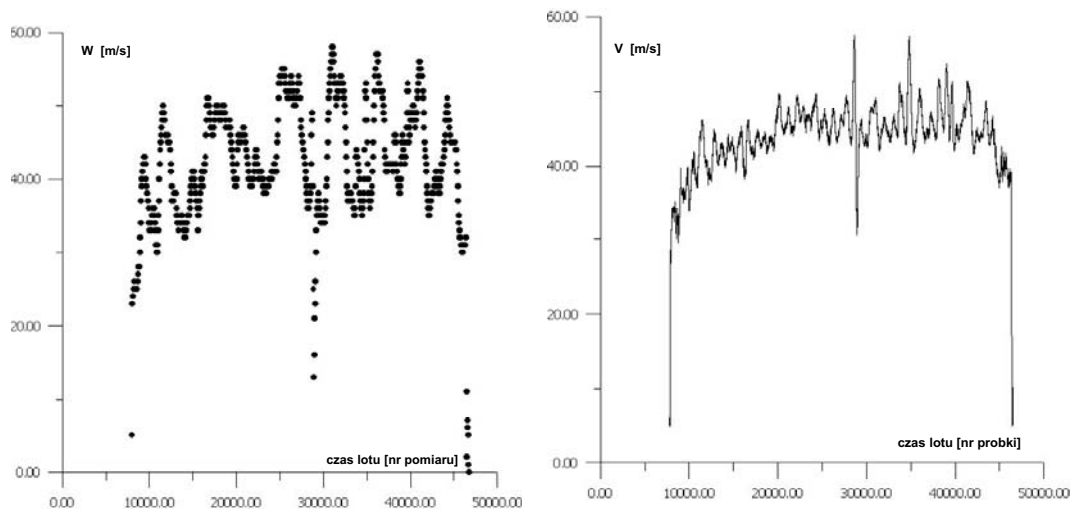
Rys. 3. Trzy anemometry mierzące trzy składowe prędkości powietrza



Rys. 4. Anemometry przygotowane do pomiaru profilu przepływu

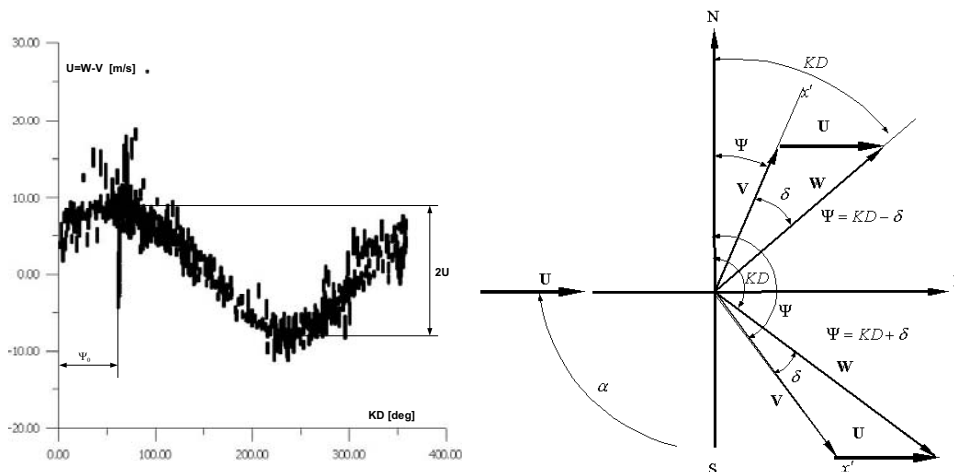
2.2. Metodę opartą na odbiorniku GPS i pomiarze ciśnieniowym

Na rys. 5 przedstawiono pomiary z lotów: prędkości podróżnej W (wykres lewy) i przyrządowej V (wykres prawy) wykonane w czasie lotu małego samolotu bezzałogowego.



Rys. 5. Prędkości: podróżna (W – GPS) i przyrządowa (V – pomiar ciśnienia dynamicznego)

Prędkość podróżna, jak widać, została zmierzona za pomocą odbiornika GPS z częstotliwością 1 Hz, a prędkość przyrządowa za pomocą czujnika ciśnienia dynamicznego wykonanego w technologii MEMS. Częstotliwość tego pomiaru wyniosła 100 Hz. Na rys. 6 z lewej, przedstawiono różnicę obu tych prędkości w funkcji kąta drogi (KD), zmierzonego za pomocą odbiornika GPS. Jak łatwo zauważyć jest to uśredniony wykres prędkości wiatru (U) w funkcji kąta drogi. Na rys. 6 z prawej przedstawiono tzw. trójkąt prędkości, na jego podstawie można łatwo zinterpretować zależności pomiędzy wymienionymi powyżej wielkościami. Z rys. 6 z lewej, można odczytać takie wielkości jak: kierunek wiatru (kątem dla wartości maksymalnej prędkości wiatru), czy amplitudę wiatru (na rysunku pokazana została podwójna amplituda prędkości wiatru). Na podstawie zarejestrowanych przebiegów i zależności pokazanych na rys. 6 można również wyznaczyć kąt znoszenia w funkcji kąta drogi. Umożliwia to np. odtworzenie kursu na podstawie zmierzonego kąta drogi (w sytuacji, gdy głównym źródłem pomiarów jest odbiornik GPS).



Rys. 6. Obliczone parametry wiatru: kierunek wiatru ($\alpha = \Psi_0$) oraz prędkość (U) – z lewej, trójkąt prędkości (KD – kąt drogi, Ψ – kurs, azymut, V – prędkość względem powietrza, W – prędkość podróżna, U – prędkość wiatru, δ – kąt znoszenia, α – kąt wiatru) – z prawej

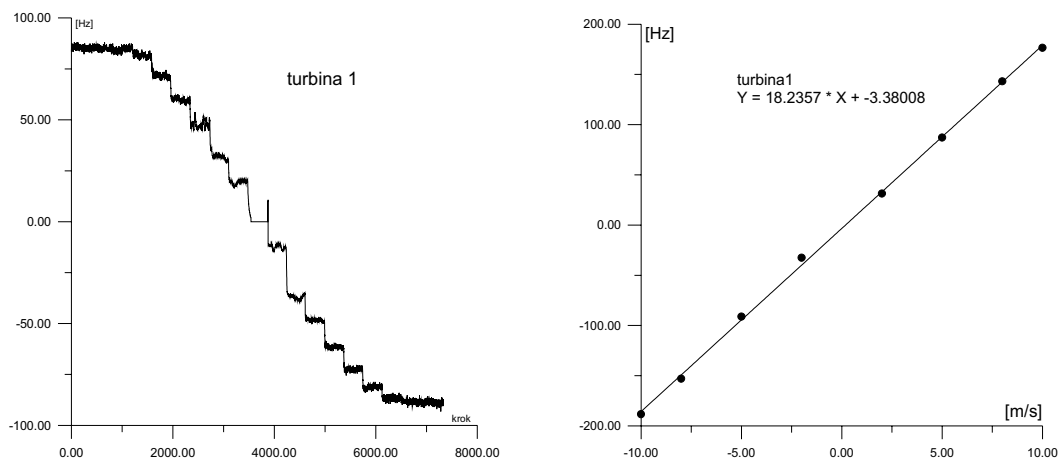
3. WSTĘPNE WYNIKI BADAŃ UKŁADÓW

3.1 Metodę anemometryczną z turbinkami

Badania funkcjonalne tego układów dokonano w dwojaki sposób. Pierwsze badanie polegało na sprawdzeniu poprawności sygnalizacji uruchomienia systemu i poprawności przesyłania danych radiomodemem i archiwizacji w dołączonym do odbiornika komputerze. Po pozytywnym wyniku pierwszego badania, wykonano drugie badanie. Czujniki umieszczono kolejno w obrotowym uchwycie, który umieszczono w tunelu aerodynamicznym małych prędkości. Dla ustalonego przepływu 5 m/s zarejestrowano, co 10 deg, w zakresie 180 deg od osi przepływu odpowiedź każdej z turbin. Na rys. 7 z lewej przedstawiono wykres dla pierwszej turbiny. Wykresy pozostałych turbin były podobne.

Następnie przeprowadzono wzorcowanie. W tunelu aerodynamicznym małych prędkości umieszczono w przepływie wszystkie 5 czujników. Zmieniano w zakresie 0÷10 m/s przepływ powietrza. Prędkość kontrolowano sondą ciśnieniową (rurka Prandtla) i wodnym manometrem z dokładnością 0,1 mm H₂O. W trakcie pomiaru obracano czujniki o 180 deg aby zarejestrować wskazania również dla prędkości ujemnych.

Uśrednione wartości otrzymanych częstotliwości przedstawiono w tab. 1:



Rys. 7. Charakterystyka dookólna (co 10 deg) turbinki nr 1 dla 5 m/s (z lewej) oraz charakterystyka w zakresie ± 10 m/s (z prawej)

Tab. 1

Prędkość [m/s]	Czujnik 1 [Hz]	Czujnik 2 [Hz]	Czujnik 3 [Hz]	Czujnik 4 [Hz]	Czujnik 5 [Hz]
-10	-188.4804	-183.6606	-181.7975	-179.9193	-191.4195
-8	-153.0382	-148.7334	-146.5151	-145.9883	-154.3354
-5	-91.17496	-88.66357	-86.25345	-88.64557	-90.42348
-2	-32.54053	-32.28957	-30.13495	-31.76505	-32.15462
2	31.35222	31.13072	30.92526	32.94283	32.18703
5	87.15284	85.8894	88.04623	90.62765	88.61813
8	143.2185	140.7826	150.0473	150.8835	146.6852
10	176.4699	174.007	186.4751	186.8371	180.1886

Na rys. 7 (z prawej) przedstawiono przykładowy wynik wzorcowania czujnika 1. Poza punktami pomiarowymi na rysunku przedstawiono prostą, która najlepiej dopasowuje dane doświadczalne. Pierwszy współczynnik tej prostej jest współczynnikiem skali (w Hz/m/s), drugi, stałym przesunięciem charakterystyki wynikającym z niesymetrii wiatraczka, zamocowania (w Hz).

Przeprowadzone badania laboratoryjne wykonanego odległościowego systemu anemometrycznego pomiaru prędkości względem powietrza pozwalają na sformułowanie następujących wniosków:

- system funkcjonuje poprawnie,
- mierzona prędkość strugi powietrza może być odchylona od osi turbinki anemometru o kąt ± 20 deg bez widocznej straty dokładności pomiaru,
- w zakresie przewidzianym do badań (± 10 m/s) błędy względne czujników odniesione do pełnego zakresu są poniżej 2 %. Poniższa tabela przedstawia wartości błędów:

Tab. 2

Prędkość [m/s]	Czujnik 1 [%]	Czujnik 2 [%]	Czujnik 3 [%]	Czujnik 4 [%]	Czujnik 5 [%]
-10	-0.75218	-0.6744	-0.1461	0.362086	-0.98626
-8	-1.03437	-0.89415	-0.48567	-0.37307	-0.97355
-5	0.927752	0.926476	1.014153	0.284329	1.282706
-2	2.004577	1.712207	1.37957	0.815526	2.01532
2	-0.47683	-0.52898	-1.90196	-1.51602	-0.61244
5	-0.177	-0.19556	-1.26206	-0.76521	-0.37602
8	0.195496	0.175515	0.714023	0.687616	0.302106
10	-0.68739	-0.52106	0.688067	0.504727	-0.65197

- w wyniku wzorcowania ustalono następujące współczynniki charakterystyk poszczególnych czujników (tab. 3),

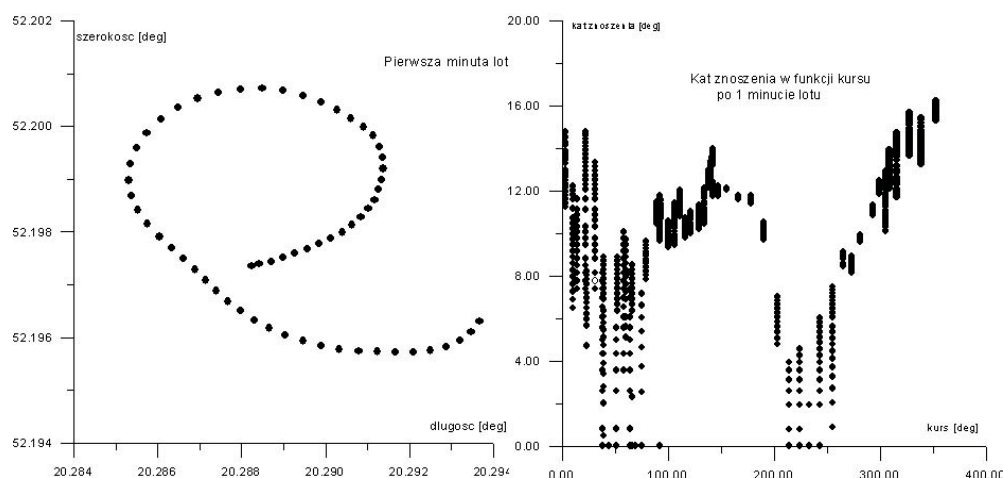
Tab. 3

Nr turbinki	Współczynnik skali [Hz/m/s]	Przesunięcie charakterystyki [Hz]
1	18.2357	-3.38008
2	17.8560	-2.69218
3	18.2613	1.3491
4	18.3117	1.87162
5	18.5185	-2.58174

- próg czułości w czujnikach nowych (nie używanych) jest na poziomie 0,2 m/s. W trakcie badań zaobserwowano po upływie pewnego czasu wzrost tej wartości do ok. 0,5 m/s przy zachowaniu dotychczasowej liniowości charakterystyki. Jest to wynikiem zużycia łożysk turbinki.
- bezwładność turbin anemometrów powoduje uśrednianie wartości chwilowych prędkości. Oszacowano stałą czasową turbin na poniżej 0,5 s.

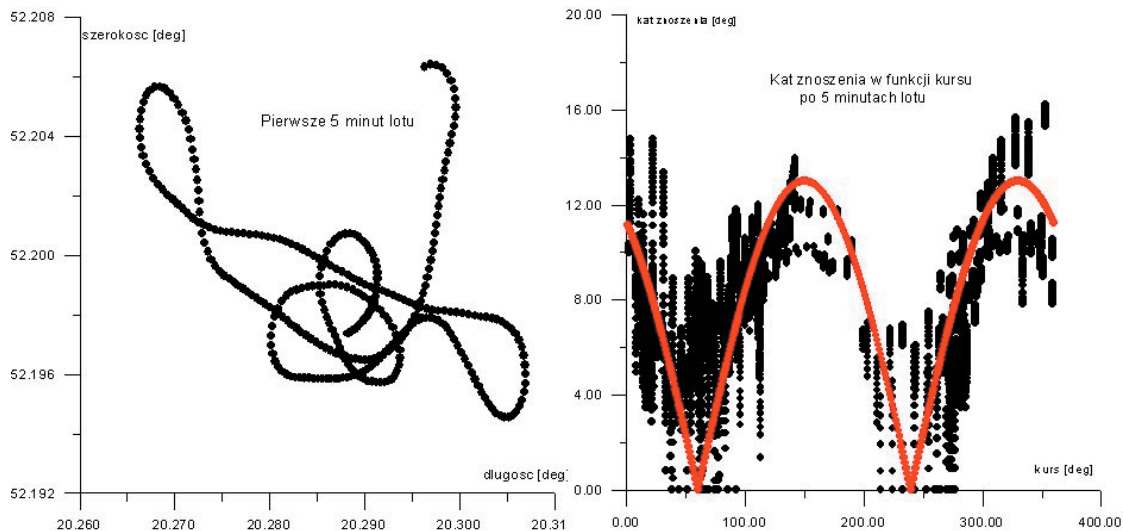
3.2 Metodę opartą na odbiorniku GPS i pomiarze ciśnieniowym

Tą metodę przebadano na pokładzie samolotu bezałogowego. Na pokładzie umieszczono: odbiornik GPS, ciśnieniową sondę (rurkę Prandtla) z czujnikiem ciśnienia oraz pozostałe wyposażenie (czujniki inercyjne, sondę magnetyczną i wysokościomierz). Po krótkim wznoszeniu samolot zaczął wykonać lot po okręgu (rys. 8 lewy). Zarejestrowana prędkość podróży, jak i przyrządowa, przedstawiona jest na rys. 5, a uśrednione parametry wiatru na rys. 6.



Rys. 8. Trajektoria i obliczony kąt znoszenia w ciągu 1 min

Rys. 8 (z lewej) przedstawia trajektorię tego lotu w płaszczyźnie horyzontalnym w ciągu pierwszej minuty. Na rys. 8 z prawej, przedstawiono wykres oszacowanego w tym czasie kąta znoszenia. Rys. 9 przedstawia te same wykresy wykreślone dla pięciominutowego lotu. Jak widać wyznaczone wielkości nie różnią się bardzo od tych wyznaczonych dla lotu jednoczasowego. Ważne jest, aby krótki lot obejmował wszystkie kąty drogi (np. lot po okręgu).



Rys. 9. Trajektoria i obliczony kąt znoszenia w ciągu 5 min

5. WNIOSKI KOŃCOWE

Wybrana do realizacji metoda anemometryczna z turbinkami pozwala w prosty i bezpośredni sposób mierzyć małe prędkości względem powietrza z zadawalającą dokładnością. Aby zwiększyć wiarygodność pomiaru oraz umożliwić pomiary w różnych kierunkach zastosowano pomiar wielopunktowy (w wersji aktualnie testowanej, do ośmiu czujników). Poprzez umiejętne umieszczenie czujników turbinowych można precyzyjnie oszacować interesujące prędkości względem powietrza. W celu łatwej organizacji pomiarów zastosowano do transmisji danych łącze radiowe i standard RS-232.

W dalszej realizacji pracy rozważana jest możliwość zintegrowania pomiarów anemometrycznych z danymi uzyskanymi z odbiornika GPS o podwyższonej częstotliwości pracy (5-10 Hz) oraz danymi inercyjnymi. Dotychczasowe próby laboratoryjne przy różnych konfiguracjach pomiaru potwierdziły zalety i przydatność opisanego systemu.

Z kolei metoda oparta o GPS i pomiar ciśnieniowy charakteryzuje się możliwością pomiaru małych prędkości względem powietrza, jako suma prędkości względem ziemi z uwzględnieniem uśrednionej wartości prędkości wiatru. Taka metoda może być przydatna np. w nawigowaniu na podstawie danych aerodynamicznych samolotu z uwzględnieniem parametrów wiatru, przy wykorzystaniu bardziej zawodnego systemu GPS do aktualizacji tych parametrów.

LITERATURA

1. Dąbrowski W., Popowski S.: Dobór konfiguracji systemu pomiarów parametrów lotu BSL-a w zależności od intensywności manewrów. Konferencja Automatykacja i eksploatacja systemów sterowania i łączności, Gdynia 2003, ISBN 83-87280-60-7, tom 2, str. 349 – 356.
2. Kornfeld Richard P., Hansman R. John, Deyst John J.: The impact of GPS velocity based flight control on flight instrumentation architecture. Massachusetts Institute of Technology, June 1999.
3. Popowski S.: Pokładowy układ pomiarowo-rejestrujący w badaniach zjawiska pierścienia wirowego, VI Forum Wiroplątowe, Warszawa, październik 2005.