

PRĘDKOŚCIOMIERZ MAŁYCH PRĘDKOŚCI

Jan Dziupiński
Instytut Lotnictwa

Streszczenie

Istnieje potrzeba pomiaru prędkości podczas badania i testowania nowych bardziej bezpiecznych konstrukcji dla zastosowań lotniczych i samochodowych. W artykule opisano Prędkościomierz małych prędkości PMP-1, omówiono jego zasadę działania i budowę. Przeprowadzono teoretyczną analizę jego dokładności pomiaru. W dalszej części opisano stanowisko umożliwiające wykonanie badania dokładności prędkościomierza PMP-1 i zaprezentowano uzyskane wyniki.

1. WSTĘP

Potrzeba opracowania przyrządu do pomiaru małych prędkości pojawiła się gdy były prowadzone prace nad konstrukcją amortyzatorów lotniczych ze sterowaniem tłumienia. Pomiar prędkości pozwalał określić impuls energii który musiał być pochłonięty przez amortyzatory w momencie przyziemienia. Potrzeba pomiaru prędkości pojawia się także w badaniach różnorodnych sytuacji crashowych, które prowadzi się testując nowe rozwiązania technologiczne i nowe konstrukcje aby uzyskać wzrost komfortu podczas używania, a przede wszystkim wzrost bezpieczeństwa konstrukcji.

2. ZASADY FIZYCZNE POMIARU PRĘDKOŚCI

Zasada pomiaru prędkości Prędkościomierzem małych prędkości PMP-1 oparta jest na wykorzystaniu efektu Dopplera. Okazuje się, że w sytuacji kiedy źródło emitujące falę o określonej i stałej częstotliwości lub odbiornik odbierający tę falę porusza się względem ośrodka, w którym fala się rozchodzi, częstotliwość fali wysyłanej przez źródło f i częstotliwość fali rejestrowanej w odbiorniku f' różnią się wzajemnie.

Gdy zjawisko Dopplera jest związane z falami elektromagnetycznymi, które rozchodzą się z prędkością około $2,997925 \cdot 10^8$ m/s, co oznacza, że $v \ll c$ oraz gdy założymy, że oś układu nadawczo-odbiorczego pokrywa się z kierunkiem prędkości to częstotliwość dopplerowską f_d opisuje zależność:

$$f_d = f - f' = -v \frac{2f}{c}$$

Pomiar prędkości tą metodą sprowadza się do określenia częstotliwości dopplerowskiej f_d i obliczenia prędkości v z zależności:

$$v = -f_d \frac{c}{2f}$$

W zastosowanym rozwiązaniu emitowana mikrofała o długości 12 mm podlega podobnym zjawiskom jak fale świetlne tzn. rozpraszaniu, odbiciu, ugięciu i interferencji.

Moc sygnału odbieranego jest odwrotnie proporcjonalna do czwartej potęgi odległości i jest wprost proporcjonalna do efektywnej powierzchni odbijającej obiektu. Efektywna powierzchnia

odbicia zależy od wielkości, kształtu obiektu, rodzaju materiału i jego porowatości.

Zjawiska te występujące w rzeczywistych warunkach pracy prędkościomierza ograniczają jego parametry, ale ich wpływ jest mniejszy niż w urządzeniach wykorzystujących fale większej długości. Jest to szczególnie widoczne w złych warunkach atmosferycznych (np. we mgle, deszczu).

3. OPIS PRĘDKOŚCIOMIERZA PMP-1

Prędkościomierz małych prędkości PMP-1 ma budowę kompaktową. Widok przyrządu jest pokazany na rysunku 1. We wspólnej obudowie umieszczone są:

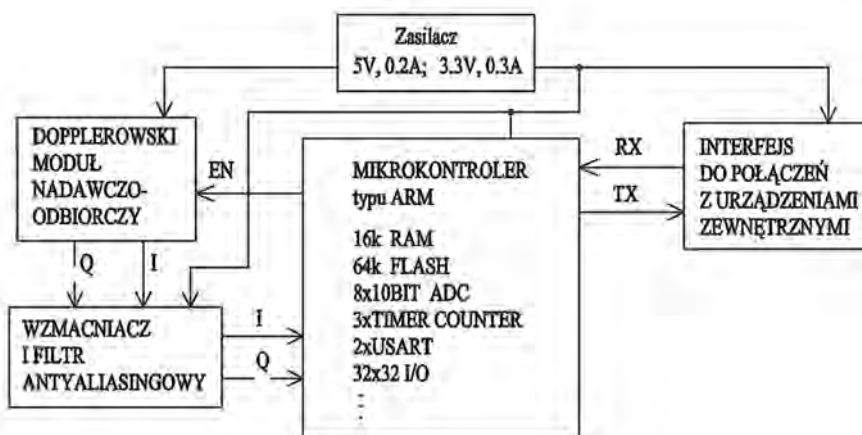
- moduł nadawczo-odbiorczy DF100
- moduł układu elektronicznego i moduł zasilania.

Schemat blokowy PMP-1 przedstawiony jest na rysunku 2.

Moduły elektroniki i zasilania prędkościomierza zamocowane są w dwuczęściowej obudowie wykonanej z duraluminium. Moduł nadawczo-odbiorczy przymocowany jest z zewnętrznej strony do obudowy. W obudowie wykonany jest otwór dla umożliwienia poprowadzenia wiązki łączącej moduł nadawczo-odbiorczy z modułem elektronicznego. Moduł nadawczo-odbiorczy chroniony jest przed narażeniami w trudnych warunkach środowiskowych obudową wykonaną z tworzywa przenikliwego dla emitowanej wiązki mikrofalowej. Grubość ścianki obudowy wynosi 2 mm, zaś szczelina powietrzna pomiędzy ścianką obudowy a powierzchnią anteny ma 6 mm.



Rys. 1. Widok prędkościomierzy PMP-1R i PMP-1A



Rys. 2. Schemat blokowy prędkościomierza PMP-1

Na zewnątrz obudowy wyprowadzone jest złącze D-sub15, które umożliwia zasilanie urządzenia, połączenie z interfejsem RS232 lub Arinc429 i z sygnałami ZAKRES, BŁĄD, STPOM oraz AWARIA ZASILANIA.+

3.1. Moduł nadawczo-odbiorczy DF100

Mikrofalowy moduł nadawczo-odbiorczy pracuje w zakresie pasma K z falą ciągłą o częstotliwości 24,125 GHz i mocą promieniowania (EIRP) 20 dBm. Jego anteny nadawcza i odbiorcza wykonane są w postaci obwodu drukowanego. Moduł posiada wzmacniacz LNA o małych szumach i przedwzmacniacz umożliwiający osiągnięcie dużej czułości. Szerokość wiązki antenowej (3db) w azymucie wynosi 12°, a w elewacji 24°. Moduł generuje dwa sygnały I i Q o częstotliwości dopplerowskiej przesunięte w fazie o 90° względem siebie.

3.2. Moduł układu elektronicznego

Moduł układu elektronicznego tworzą: układ wzmacniacza i filtru antyaliasingowego, mikrokontroler typu ARM, interfejs do połączenia z urządzeniem zewnętrznym typu RS232 lub opcjonalnie Arinc 429. Rolę filtru antyaliasingowego spełnia aktywny filtr dolnoprzepustowy Butterwortha o częstotliwości granicznej $f_g = 1610$ Hz odpowiadającej zakresowi pomiarowemu prędkościomierza. Jego zadaniem jest tłumienie niepożądanego energii sygnału powyżej częstotliwości f_g i wyeliminowanie możliwości wystąpienia zjawiska aliasingu widmowego na wyjściu przetwornika A/C.

W dziedzinie częstotliwości istnieje niejednoznaczność związana z próbkami sygnału o czasie dyskretnym. Występują powielenia widmowe sygnału spróbkowanego, które będą nakładać się i będzie występował aliasing, gdy szerokość pasma nas interesującego B będzie większa od połowy częstotliwości próbkowania ($B > f_s/2$). Aby tłumienie filtru było efektywne, jego częstotliwość graniczna musi być większa niż zakres częstotliwości jaki nas interesuje, ale mniejsza od połowy szybkości próbkowania.

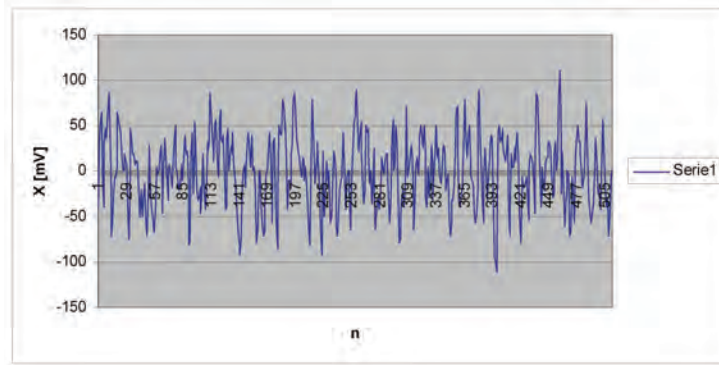
Kolejne występujące po filtrowaniu operacje przetwarzania sygnału prędkości realizuje mikrokontroler oparty na 32-bitowym ARM RISC procesorze. Charakteryzuje się on rozbudowanym systemem peryferii, co umożliwiło zbudowanie kompletnego systemu z minimalną liczbą zewnętrznymi peryferii. Mikrokontroler wykonuje: próbkowanie sygnału ciągłego i zapamiętuje próbki w pamięci SARAM, szybką transformatę Fouriera (FFT), oblicza moduły uzyskanych prążków, detekcję prążka odpowiadającego mierzonej prędkości, wylicza prędkość i przesyła wynik interfejsem RS232 (opcjonalnie Arinc429) do urządzenia zewnętrznego.

Proces próbkowania przebiega cyklicznie z okresem określonym przez TIMER COUNTER mikrokontrolera. Współbieżnie z próbkowaniem realizowany jest proces analizy częstotliwościowej sygnału prędkości. Interpretacja wyników szybkiej transformaty Fouriera (FFT) sprowadza się do wyznaczenia w jednostkach bezwzględnych wartości częstotliwości środkowych występujących w widmie prążków FFT. Następnie na podstawie wyników widmowych FFT jest określana amplituda sygnałów z dziedziny czasu, dokonywany jest wybór prążka którego częstotliwość odpowiada zmierzonej prędkości, zostaje obliczona prędkość i uzyskany wynik przesyłany jest do komputera.

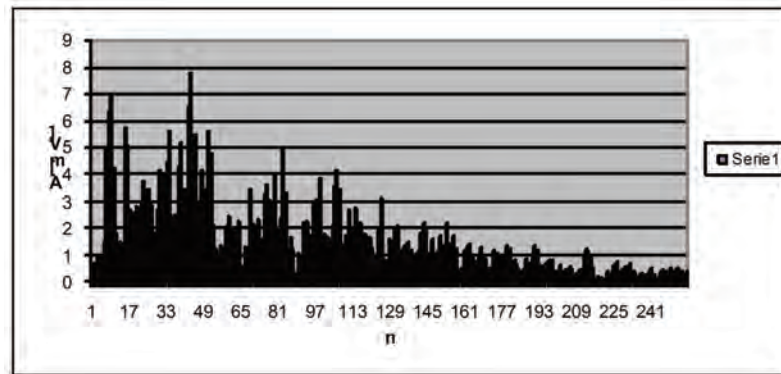
Dla zapewnienia poprawnego pomiaru amplituda wyznaczonych prążków powinna być powyżej uśrednionego poziomu szumu wyjściowego. W tym celu określono poziom pojawiających się zakłóceń i szumu.

Zarejestrowany przebieg takiego sygnału przedstawiony jest na rysunku 3, a na rysunku 4 – moduł wartości wyjściowych FFT sygnału.

Na podstawie uzyskanej informacji o występujących zakłóceniach określono wymagany poziom czułości układu. Konsekwencją tego było wprowadzenie do oprogramowania odpowiednich warunków dla modułu prążka odpowiadającego mierzonej prędkości.



Rys. 3. Przebieg sygnału zakłócającego i szumu



Rys. 4. Moduł wartości wyjściowych FFT zarejestrowanego sygnału

W module elektronicznym wytwarzane są sygnały dodatkowe informujące o stanie przyrządu:

- ZAKRES – oznaczający przekroczenie zakresu pomiarowego oraz
- BŁĄD – oznaczający wystąpienie błędu podczas pomiaru.

Prędkościomierz PMP-1 może pracować w dwóch trybach, jako prędkościomierz, który jest trybem podstawowym i jako rejestrator sygnału prędkości. Podczas pracy jako rejestrator jego cykl pracy uruchamiany jest sygnałem zewnętrznym STPOM.

Linie interfejsu RS232 lub Arinc429 służące do transmisji wyniku pomiaru są odizolowane galwanicznie od modułu elektroniki. Izolację taką posiadają również linie sygnałów dodatkowych ZAKRES, BŁĄD i STPOM. Wszystkie te linie są doprowadzone na styki złącza D-sub15 i są zabezpieczone przed skutkami impulsów indukowanych podczas wyłączeń atmosferycznych.

3.3. Moduł zasilania

Moduł zasilania zapewnia poprawną pracę prędkościomierza przy napięciu zasilającym, zmieniającym się w granicach od 9VDC do 32VDC. W układzie zasilania zastosowano przetwornice DC/DC aby zrealizować odizolowanie galwaniczne modułu elektroniki od zewnętrznej instalacji zasilającej. Dostarczają one napięcie +5VDC i 12VDC. Dla uzyskania napięcia 3,3V wymaganego przez mikrokontroler zastosowano dodatkowy regulator napięcia.

Na wejściu modułu zasilania jest zastosowany bezpiecznik topikowy i układ zabezpieczający przed skutkami pojawiających się impulsów zakłócających.

Moduł generuje sygnał AWARIA ZASILANIA wyprowadzony na złącze D-sub15. Zwarcie styku przekaźnika oznacza brak zasilania.

3.4. Dokładność pomiaru PMP-1

O dokładności pomiaru prędkości decydują dwa składniki błędu. Podstawowym składnikiem jest błąd wynikający z rozdzielczości pomiaru. Drugim składnikiem błędu jest zmienność częstotliwości próbkowania, która zależy od parametrów zastosowanego kwarcu. Zgodnie z danymi katalogowymi zastosowany kwarc charakteryzuje tolerancja częstotliwości $\pm 30\text{ppm}$ i stabilność częstotliwościowa $\pm 50\text{ppm}$. Daje to całkowitą zmianę częstotliwości $\pm 80\text{ppm}$.

Zależność prędkości od częstotliwości f_{osc} opisuje następująca zależność:

$$v = \frac{c}{2 * f} * f_d = \frac{c}{2 * f} * \frac{m}{N} * \frac{\frac{1}{2} * f_{osc} * \frac{74}{14}}{2 * 5832}$$

Podstawiając następujące wartości liczbowe:

$$c = 2,997925 * 10^8 \text{ m/s}$$

$$f = 24,125 * 10^9 \text{ Hz}$$

$$N = 512 \text{ próbek}$$

$$f_{osc} = 18432000 \text{ Hz}$$

otrzymujemy:

$$V = 2,7125 * 10^{-9} * m * f_{osc}$$

stąd:

$$\Delta V = 2,7125 * 10^{-9} * (\Delta m * f_{osc} + m * \Delta f_{osc}) \text{ gdzie } \Delta f_{osc} = \pm 80 * 10^{-6} * f_{osc}, \text{ a } \Delta m = \pm 0,5$$

Po wykonaniu obliczeń otrzymujemy błąd pomiaru prędkości

$$V = \pm 0,0258 \pm 8 * 10^{-5} * V$$

Błąd ten ma składową zależną od wartości mierzonej prędkości.

W przeprowadzonej analizie błędów nie uwzględniono wpływu modułu nadawczo-odbiorczego DF100 na dokładność pomiaru uznając go za nieistotny, gdyż producent nie podaje w danych technicznych stosownych informacji.

3.5. Dane techniczne PMP-1

- Napięcie zasilania-(9 ÷ 32) VDC
- Prąd zasilania:
 - PMP1-R-max. 100 mA
 - PMP1-A-max. 150 mA
- wymiary-110x100x55 mm³,
- masa-0,5 kg
- zakres pomiarowy-(0 ÷ 10) m/s
- dokładność pomiaru- ±0,026 m/s
- rozdzielczość pomiaru-0,05 m/s
- Częstotliwość powtarzania pomiaru >10 pomiarów/s
- Zasięg-ok. 100 m
- Sygnalizacja niesprawności- AWARIA ZASILANIA
 - BŁĄD
 - ZAKRES
- Częstotliwość pracy-24,125 ±0,125 GHz
- Modulacja-CW
- ukształtowanie wiązki w poziomie 12°
- w pionie-25°
- Interfejs-RS232 lub Arinc 429
- Zakres temperatury pracy-20°C ÷ +60°C
- Temperatury przetrwania niska i wysoka-40°C i +80°C

4. SPRAWDZENIE DOKŁADNOŚCI POMIARU PRĘDKOŚCIOMIERZA PMP-1

Sprawdzenia dokładności pomiaru prędkości przyrządem PMP1 dokonano na wykonanym stanowisku. Sprawdzenie polegało na porównaniu prędkości zmierzonej prędkościomierzem PMP-1 z prędkością zmierzona blokiem pomiarowym w które wyposażone jest stanowisko. Aby możliwe było porównanie uzyskanych wyników, pomiary były zsynchronizowane i wykonywały się współbieżnie.

Na rysunku 6 przedstawione jest kompletne stanowisko podczas badań.

4.1. Opis stanowiska

Stanowisko do sprawdzenia prędkościomierza PMP-1 składa się z:

- toru po którym porusza się wózek z umieszczoną na nim płytą wykonaną z laminatu foliowanego miedzią o powierzchni ok. 0.016m². Płyta ta służy do odbijania fali emitowanej przez prędkościomierz PMP-1;
- dwóch czujników fotoelektrycznych umieszczonych na początku i końcu drogi na której jest dokonywany pomiar prędkości przemieszczającego się wózka. Przy pomiarze prędkości z zakresu 1 m/s odległość między czujnikami wynosi 0,1 m. Odległość ta może być zwiększona maksymalnie do 0,4 m z podziałką 0,1 m.
- bloku pomiarowego który tworzą umieszczone we wspólnej obudowie układ elektroniczny z mikrokontrolerem, wyświetlacz LCD do wyświetlania komunikatów i zmierzonej prędkości oraz komplet złącz służących do połączenia z czujnikami fotoelektrycznymi, prędkościomierzem PMP-1, z komputerem (RS232) i złącze do zasilania stanowiska. Blok pomiarowy pokazany jest na fotografii umieszczonej na rysunku 5.



Rys. 5. Blok pomiarowy

4.2. Zasada pomiaru

Pomiar prędkości na stanowisku sprowadza się do pomiaru czasu przebycia drogi określonej odległością rozstawienia czujników fotoelektrycznych.

Poruszający się po torze wózek przysłania kolejno jeden potem drugi czujnik, które generują impulsy określające początek i koniec drogi pomiarowej. Na ich podstawie układ elektroniczny bloku pomiarowego generuje sygnał czasu trwania pomiaru który jest doprowadzony do wejścia P10A0 mikrokontrolera i poprzez odpowiednie łącze do prędkościomierza PMP-1. Sygnał ten uruchamia cykl pomiarowy PMP-1 pracującego w trybie rejestracji. Pomiar czasu realizuje mikrokontroler według ustalonego algorytmu. W tym celu zaprogramowano TIMER/COUNTER TC2 w trybie WAVEFORM by generował przebieg o częstotliwości 500000 Hz, zaś TC0 w trybie CAPTURE aby umożliwić zliczanie generowanych impulsów. Dodatkowo zbocze sygnału na wejściu P10A0 uruchamia, zaś ujemne kończy zliczanie impulsów o okresie trwania 2 μ s. Po zakończeniu zliczania impulsów mikrokontroler odczytuje zawartość 16-bitowego licznika TC0_RA i wylicza wartość mierzonej prędkości zgodnie z zależnością $V = L * 500000 / TC0_RA$, w której V oznacza mierzoną prędkość L – odległość między czujnikami fotoelektrycznymi, $TC0_RA$ – liczbę zliczonych impulsów.

4.3. Błąd pomiaru prędkości mierzonej na stanowisku

Dla zastosowanej metody pomiaru prędkości obowiązuje zależność $V = L / t$. Błąd pomiaru można obliczyć następująco:

$$\frac{\Delta V}{V} = \frac{\Delta L}{L} + \frac{\Delta t}{t}$$

gdzie:

ΔL -jest dokładnością rozstawienia czujników fotoelektrycznych równą 0,1mm,

Δt -jest błędem pomiaru czasu wynoszącym 2 μs , zaś t -jest czasem przebycia drogi $L = 0,1$ m.

W tych warunkach prędkość 1 m/s jest mierzona z dokładnością

$$\frac{\Delta V}{V} = \frac{0,1mm}{0,1m} + \frac{2\mu s}{0,1s} = 0,00102$$

$$\frac{\Delta V}{V} = 0,102\%$$

Zmierzona prędkość ma wartość $V = 1$ m/s \pm 0,00102 m/s.

W podobny sposób można oszacować dokładność każdej zmierzonej prędkości.

Porównując zmierzona prędkość na stanowisku z prędkością uzyskaną z prędkościomierza należy pamiętać, że czas trwania procesu próbkowania wynosi ok. 0,1s.



Rys. 6. Stanowisko do sprawdzenia prędkościomierza

4.4. Badanie dokładności prędkościomierza PMP-1

Do sprawdzenia dokładności pomiaru prędkości prędkościomierzem PMP-1 wykorzystano wykonane stanowisko. Przygotowanie stanowiska do sprawdzenia wymagało połączenia kablem sprawdzanego prędkościomierza z modułem pomiarowym i za pomocą interfejsu RS232 z komputerem. Połączenie z komputerem umożliwia odczytanie wartości prędkości zmierzonej prędkościomierzem. Po załączeniu zasilania można było przystąpić do pomiarów. Wielokrotnie wprawiano w ruch wózek poruszający się po torze i dokonywano odczytów prędkości V_{sr} zmierzonej modułem pomiarowym stanowiska i V_{PMP1} zmierzonej prędkościomierzem PMP-1. Wyniki pomiarów zestawione są w tabeli 1.

W przeprowadzonym sprawdzeniu prędkościomierza PMP-1 uzyskano zgodność mierzonej dwoma metodami prędkości na poziomie 2,5%.

Tabela 1. Zestawienie zmierzonych prędkości V_{sr} i V_{PMP1}

Lp.	V_{sr} [m/s]	V_{PMP1} [m/s]	$\Delta V = V_{PMP1} - V_{sr}$ [m/s]
1	0,83	0,85	0,02
2	1,18	1,15	-0,03
3	1,75	1,75	0,00
4	2,46	2,40	-0,06
5	1,67	1,65	-0,02
6	1,03	1,00	-0,03
7	2,87	2,80	-0,07
8	2,55	2,50	-0,05
9	3,33	3,25	-0,08
10	3,81	3,75	-0,06
11	3,60	3,55	-0,05
12	3,39	3,35	-0,04
13	3,87	3,80	-0,07

5. PODSUMOWANIE

Wykonany prędkościomierz PMP-1 spełnia założone wymagania. Charakteryzuje się dużą dokładnością pomiaru prędkości (0,8%) i małą stałą czasu (>10 pomiarów na sekundę).

Obecnie celowe jest przeprowadzenie badań laboratoryjnych w Laboratorium Badania Podwozi, aby ocenić jego przydatność w rzeczywistych warunkach i zastosowaniach takich jak pomiar prędkości opadania samolotu podczas lądowania, wykorzystanie w adaptacyjnych fotelach, testach crashowych, testach bezpieczeństwa itp. Może być również wykorzystywany do pomiarów prędkości w warunkach Laboratorium Badania Podwozi.

Prędkościomierz w wersji przeznaczonej do zabudowy na samolocie, powinien mieć możliwość uwzględniania wpływu zmiany kątów pochylenia i przechylenia samolotu na mierzoną prędkość pionową podczas przyziemienia. Prędkościomierz PMP-1 nie ma takiej możliwości.

BIBLIOGRAFIA

- [1] **Mioduszewski A.:** RADAROWY MIERNIK ODLEGŁOŚCI DO PRZESZKODY DLA ŚMIGŁOWCÓW RATOWNICZYCH, Prace Instytutu Lotnictwa, 2009.
- [2] **Dziupiński J.:** Prędkościomierz opadania samolotu podczas lądowania, Journal of Aeronautica Integra 1/2008
- [3] **Innocent Innovative Sensor Technology, Standard Products:** Version; 2008-01-29
- [4] **Lyons R. G. :** Wprowadzenie do cyfrowego przetwarzania sygnałów. WKŁ Warszawa, 2006
- [5] **DF100 DOPPLER RF TRANCEIVER MODULE:** Technical Specifications. ST Electronics (Satcom & Sensor Systems) Pte Ltd. Singapore, 2006, website: www.agilsense.com

Jan Dziupiński

Summary

There is a need for a speed measurement during investigations and testing of a new, more secure designs for the aviation and automotive applications. The article describes the low speeds speedometer PMP-1, discusses it's principle of operation and design. The theoretical analysis of its accuracy was conducted. In the following article paragraphs author describes the test stand for the testing the accuracy of the PMP-1 speedometer and presents the results.