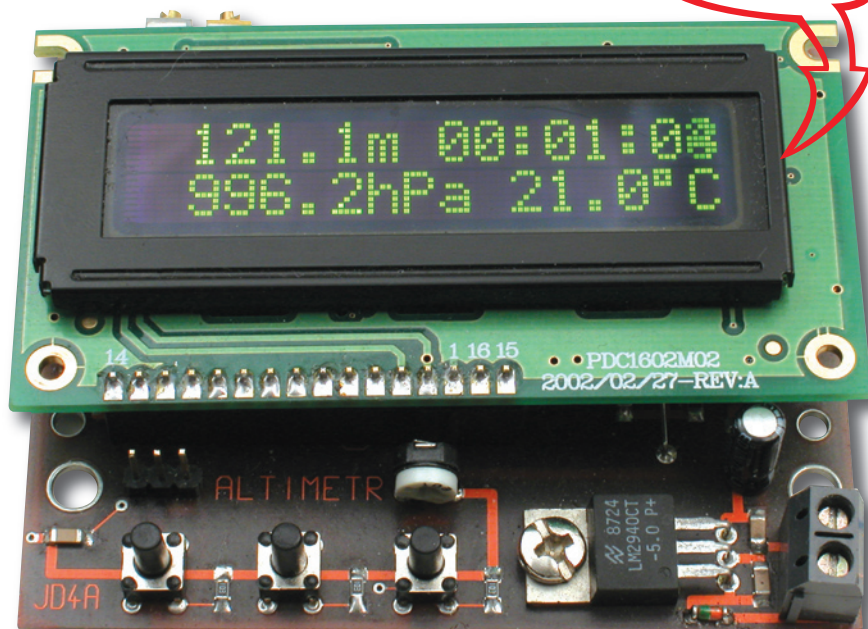


Wysokościomierz, część 1 AVT-916

PROJEKT
Z OKŁADKI

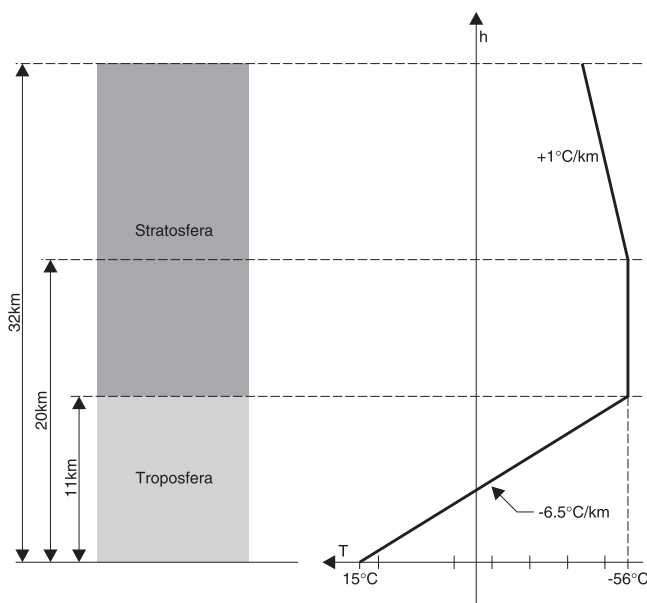
Latanie było odwiecznym marzeniem człowieka. Spełniło się całkiem niedawno, bo prawie równo 100 lat temu. Dla homo sapiens, to jak mgnienie oka. Opanowanie umiejętności podniesienia samolotu w powietrze to jednak dopiero połowa sukcesu. Do prowadzenia bezpiecznego lotu pilotowi potrzebne jeszcze były różnorodne przyrządy pokładowe, w tym wysokościomierz.

Rekomendacje:
prezentowany układ nie ma wymaganych certyfikatów by służyć do „oficjalnego” pomiaru wysokości. Może być jednak używany tam, gdzie te certyfikaty nie są wymagane, a jednocześnie użytkownik chce rejestrować osiągnięte wysokości, np. w turystyce górskiej lub lotniarstwie.



„Sierra, Papa – Alpha, Victor, Tango... Sierra, Papa – Alpha, Victor, Tango...”. To umowne wywołanie statku powietrznego, jednoznacznie identyfikujące go spośród tysięcy innych na całym świecie. Dziś samoloty przesywają nasze niebo co kilka minut i najczęściej nawet nie zdajemy sobie sprawy z tego, że historia lotnictwa nie sięga w bardzo zamierzchłe czasy. Cofnijmy się na chwilę do zdarzeń, które rozegrały się na wzgórzach Północnej Karoliny 17 grudnia 1903 roku. To właśnie wtedy rozpoczęła się epoka, w której człowiek zapanował nad przestworzami. Czas tego panowania podczas pierwszej próby nie był z dzisiejszego punktu widzenia zbyt imponujący, bo wynosił zaledwie 12 sekund, ale wystarczył, by otworzyć zupełnie nowy rozdział techniki. Po raz pierwszy udało się wówczas unieść w górę statek powietrzny cięższy od powietrza i przeprowadzić kontrolowany lot, zakończony bezpiecznym lądowaniem. Bohaterami

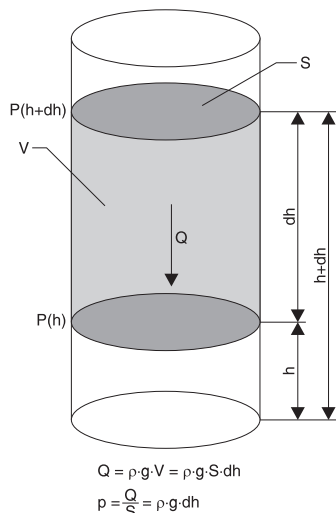
wydarzenia byli dwaj bracia Wright, chociaż pamiętnego przelotu dokonał tylko jeden z nich – Orville. Miał po prostu więcej szczęścia od Wilburra w losowaniu, które zadecydowało o tym, który z nich miał polecieć. Od wspomnianej daty rozwój lotnictwa postępował bardzo szybko. Oddając sprawiedliwość historyczną należy jednak pamiętać, że przed braćmi Wright człowiek latał już w powietrzu. Nie były to loty w pełni kontrolowane – odbywały się w balonach lub szybowcach, stąd trudno mówić,



Rys. 1. Budowa atmosfery ziemskiej z uwzględnieniem rozkładu temperatur

PODSTAWOWE PARAMETRY

- Płytko o wymiarach 101 x 65 mm
- Zasilanie: bateria 9 V (6F22R)
- Funkcje: pomiar wysokości, ciśnienia atmosferycznego, temperatury, rejestracja ciśnienia
- Zakres pomiaru ciśnienia: 850...1050 hPa
- Zakres pomiaru wysokości: ok. 1500 m
- Liczba próbek rejestratora: 1024
- Odstęp między próbkami: 1...255 s



Rys. 2. Definicja ciśnienia słupa powietrza (cieczy) o danej wysokości

że stanowiły podwaliny rozwoju tej, jakże pięknej dziedziny.

W początkowym etapie lotnictwa wszystkie przeloty statkami powietrznymi odbywały się w zasięgu widoczności ziemi. Wynikało to po pierwsze z faktu, że ówczesne samoloty nie były zdolne do wzbicia się na większe wysokości, po drugie – loty na dużych pułapach wymagałyby odpowiedniego oprzyrządowania, a takowe jeszcze w tym czasie nie powstało. Wskaźnikiem, który jako jeden z pierwszych należało opracować był wysokościomierz. Wiedza teoretyczna i dostępne środki techniczne początku XX wieku były do tego wystarczające.

Wysokościomierz ciśnieniowy

Każdy, kto kiedyś startował samolotem (mam nadzieję, że tyle samo razy szczęśliwie lądował), jechał samochodem bądź rowerem po górzystym terenie lub wjeżdżał szybkobieżną windą na górne piętra wysokościowca, zapewne odczuwał towarzyszące tym etapom podróży dość niemiłe przytępienie słuchu. Efekt ten wywołany był reakcją naszego ucha na szybkie zmiany ciśnienia atmosferycznego. Można by więc powiedzieć, że pilot został już wyposażony przez naturę w odpowiedni do pionowej nawigacji „przyrząd”, po co mu rozwiązanie techniczne? Przytkane ucho nie pozwoli jednak ocenić bezwzględnej wysokości samolotu, „poinformuje” co najwyżej o jej zmianie, a i to bez określenia kierunku. Każdy człowiek charakteryzuje się ponadto inną wrażliwością na zmiany ciśnienia, a do tych „efektów” można się przy-

zwyczaić i po pewnym czasie nawet nie zwracać na nie uwagi. Biorąc pod uwagę powyższe spostrzeżenia, koncepcja budowy altimetru (wysokościomierza) nasuwa się niemal samoistnie – wystarczy zbudować czuły barometr i wyskalować go nie w jednostkach ciśnienia (hPa, mbar, mmHg, itp.) lecz w metrach. Poniżej zostanie zaproponowana oczywiście wersja elektroniczna takiego przyrządu. Do prowadzenia obliczeń zostanie wykorzystany mikrokontroler. Przemawia za tym złożoność zjawisk z jakimi mamy do czynienia w tym przypadku.

Atmosfera standardowa, wzór barometryczny

Nawet zastosowanie mikrokontrolera nie zwoleńilo mnie z przyjęcia do obliczeń pewnych uproszczeń. Wynikają one z trudności w stworzeniu modelu matematycznego, który w akceptowalnie prosty sposób opisywałby rzeczywistość. Na marginesie można tu dodać, że tworzeniem takich modeli zajmują się bardzo poważne instytucje światowe, jak: National Advisory Committee for Aeronautics (NACA), U.S. Committee o Extension to the Standard Atmosphere (COESA), National Aeronautics and Space Administration (NASA). Organizacje te opracowały kilka standardów atmosfery ziemskiej, które obowiązują już od 1925 roku i nadal są systematycznie poprawiane i ulepszone. Publikuje się je w postaci tabel zawierających wartości poszczególnych parametrów obowiązujących na różnych wysokościach. W swoim projekcie nie sięgałem aż tak głęboko, zastosowałem daleko idące uproszczenia. Zapewne podobnie czynili konstruktorzy prostych wysokościomierzy mechanicznych, które od lat z powodzeniem są stosowane w lotnictwie.

Pierwsze założenie, to przyjęcie, że otaczające nas powietrze jest gazem doskonałym (tak naprawdę daleko mu do niego). Ciśnienie takiego gazu określone jest zależnością:

$$p = \rho k T \quad (1)$$

w której ρ – gęstość powietrza, T – temperatura [K], k jest tzw. stałą gazową równą 29,27 m/(K*g), gdzie: g – przyspieszenie ziemskie. Jak widać z powyższego wzoru ciśnienie atmosferyczne zależy m.in. od temperatury powietrza, a ta z kolei niestety zależy również od wysokości – przebieg zmian został pokazany na rys. 1. Jest to funkcja malejąca liniowo do poziomu

11000 m, powyżej temperatura jest stała aż do ok. 20000 m i wynosi -56°C, po czym nieznacznie rośnie. Gdyby pominąć wpływ temperatury na ciśnienie gazu można by przyjąć, że różnica ciśnień na wysokościach h i $h+dh$ (rys. 2) jest równa:

$$dp = p(h+dh) - p(h) = -\rho \cdot g \cdot dh \quad (2)$$

Na podstawie powyższych zależności można napisać równanie różniczkowe:

$$\frac{dp}{p} = -\frac{g}{kT} \quad (3)$$

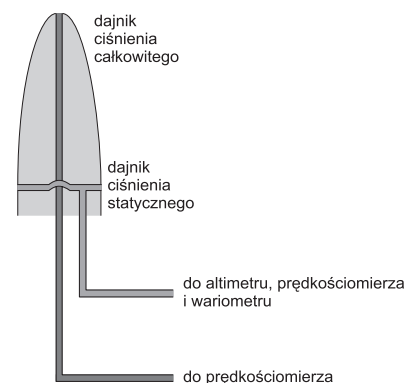
kórego rozwiązaniem (przy założeniu stałości temperatury) jest:

$$p = p_0 e^{-\frac{g}{kT}h} \quad (4)$$

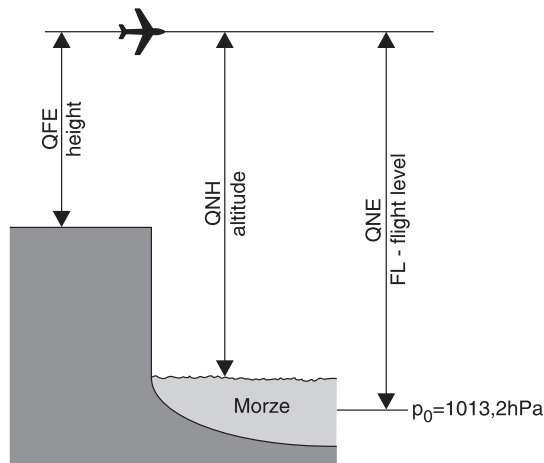
Wyrażenie (4) jest nazywane **wzorem barometrycznym**. Po odpowiednich przekształceniach formuła ta może być stosowana do obliczania wysokości:

$$\Delta h = \frac{kT}{g} \ln \frac{P_h}{P_0} = -A \ln \frac{P_h}{P_0} \quad (5)$$

Stała A dla temperatury 25°C jest równa 8727 [m]. Choć w powyższym wzorze występuje zarówno ciśnienie, jak i temperatura, to przy pogodzeniu się z popełnieniem pewnego błędu można ograniczyć się jedynie do pomiaru ciśnienia. Rezygnacja z pomiaru temperatury spowoduje zawyżenie wskazań. Przykładowo, na wysokości 1500 m altimetr pokaże o ok. 52 m za dużo. W wartościach bezwzględnych wydaje się to sporym błędem lecz błąd względny wynosi w tym przypadku jedynie 3,5%, co jest wartością „znośną”. Zmierzyć temperaturę dla elektronika, to żaden problem. W opisywanym tu urządzeniu taka możliwość została przewidziana, jednak uwzględnianie temperatury w obliczeniach może spowodować pojawienie się



Rys. 3. Sposób pobierania powietrza do przyrządów pokładowych samolotu (altimetru, wariometru i prędkościomierza)



Rys. 4. Definicje różnych rodzajów wysokości wykorzystywanych w lotnictwie

niepożądanych przekłamań. Wystąpią one, gdy temperatura powietrza zmieni się z przyczyn innych niż zmiana wysokości. Zaobserwujemy wtedy dość irytujące wahania wskazań wysokości w statycznym położeniu altimetru.

W powyższych rozważaniach teoretycznych przyjmowany był pewien idealny, w dodatku statyczny model atmosfery ziemskiej. W rzeczywistości tak nie jest, i bynajmniej nie jest to koniec kłopotów. Elektronika, to nie wszystko. Należy się jeszcze zastanowić, w jaki sposób dostarczyć powietrze do czujnika ciśnienia. Nie sądzę, żeby opisywany altimetr był instalowany w hermetycznych kabinach, ale gdyby tak się stało, to oczywiście nie będzie on działał prawidłowo mierząc ciśnienie wewnętrzne. Do prawidłowego pomiaru niezbędne jest dostarczenie powietrza z zewnątrz. Należy przy tym zadbać, aby czujnik mierzył ciśnienie statyczne. Nie spełniając tego warunku jesteśmy o krok od zbudowania prędkościomierza ☹. W samolotach lub szybowcach powietrze dla altimetru jest pobierane przez specjalne otwory w bocznej części kadłuba, dla prędkościomierza natomiast przez tzw. rurkę Pitota, która zasysa powietrze od przodu (rys. 3).

Czy samoloty mogą lecieć kursem kolizyjnym poruszając się na różnych wysokościach?

Pytanie z pozoru bez sensu, w praktyce jest to jednak możliwe (sic!). Nie, nie, nie chodzi tu o łamanie praw fizyki. Możliwość zderzenia się dwóch samolotów lecących na różnych wysokościach

wynika z różnych definicji stosowanych w lotnictwie. Przyznam, że po prześledzeniu dyskusji jaka kiedyś wywiązała się na grupie dyskusyjnej pl.rec.lotnictwo, dotyczącej pewnych fundamentalnych jakby nie było pojęć, nie czułem się najlepiej jako potencjalny pasażer linii lotniczych. Okazało się bowiem, że wśród pilotów nie ma jednoznacznej interpretacji podstawowych terminów lotniczych, z którymi mają do czynienia na co dzień. Spór nie dotyczył przy tym drobnych niuansów, ale samego sedna sprawy. Chodziło o to, co właściwie oznaczają powszechnie stosowane skróty: QFE, QNH i QNE? Czy jest to definicja wysokości, ciśnienia, czy wręcz sposobu nastawienia altimetru. Wobec tego faktu nieśmiało zaproponuję swoje wersje definicji. Będą one potrzebne do zrozumienia trybów pracy opisywanego altimetru (rys. 4), a jeśli są niezgodne z poglądami specjalistów, to z góry za to przepraszam.

QFE – wysokość mierzona od poziomu lotniska. Niektórzy interpretują to również jako ciśnienie lotniska i można doszukać się tu jakiegoś uzasadnienia, jeśli się weźmie pod uwagę, że altimetry bazują na pomiarze ciśnienia i zawsze właśnie ta wielkość fizyczna stanowi odniesienie. Na QFE będą najczęściej nastawiane altimetry statków powietrznych latających z widocznością ziemi. Wysokość mierzona od poziomu lotniska określana jest również jako height.

QNH – wysokość mierzona od poziomu morza. Do ustawienia altimetru w ten tryb niezbędne jest znormalizowanie lokalnego ciśnienia zmierzonego na znanej wysokości do odpowiadającego mu ciśnienia na poziomie morza. Do przeliczenia można założyć, że ciśnienie zmniejsza się o 1 hPa na każde 8,5 m (stopień baryczny). Przykładowo: jeśli na lotnisku w Warszawie (wysokość 110 m.n.p.) zmierzono ciśnienie 1020 hPa, to po ustawieniu altimetru w tryb QNH ciśnienie odniesienia będzie równe:

$$p_{\text{QNH}} = p_{\text{QFE}} + 110/8,5 = 1020 + 12,9 = 1032,9 \text{ hPa}$$

Zauważmy, że w tym przypadku altimetr samolotu lecącego 100 m nad ziemią, ustawiony na QFE będzie po-

kazywał wysokość 110 m, a altimetr ustawiony na QNH w samolocie lecącym tuż obok pokaże wysokość 220 m. Nie chcę nawet myśleć o tym, co mogło by się stać, gdyby piloci nie mieli świadomości trybów pracy swoich przyrządów pokładowych. Aby nie dopuścić do niebezpiecznych sytuacji odpowiednie przepisy nakazują pilotom przełączanie trybów pracy altimetrów na określonych wysokościach. Wysokość QNH stosuje się głównie w przelotach, QFE natomiast w lataniu nad lotniskiem. Wysokość mierzona od poziomu morza określana jest również jako altitude.

QNE – wysokość mierzona od umownego poziomu, na którym panuje ciśnienie standardowe 1013,2 hPa. Ze względu na to, że pilot nie zawsze dysponuje informacją o lokalnym ciśnieniu panującym na poziomie ziemi lub morza (np. podczas przelotu nad oceanem), altimetr skalibrowany wcześniej w punkcie odległym o np. 1000 km od aktualnej pozycji z pewnością nie będzie pokazywał prawidłowej wysokości QFE, a nawet QNH. W takim przypadku najbezpieczniej jest ustawić jako poziom odniesienia wartość ciśnienia przyjętą umownie na całym świecie. Przyjęto, że będzie to 1013,2 hPa, jako uśredniona wartość ciśnienia atmosferycznego na poziomie morza w temperaturze 15°C. Ustawienie altimetrów na QNE zagwarantuje, że dwaj piloci, z których jeden wystartował we Frankfurcie, drugi w Chicago w chwili spotkania się gdzieś nad oceanem, identycznie zinterpretują wskazania swoich altimetrów. Wysokość QNE stosuje się jak wiadać wyłącznie w przelotach. Uwaga: może się zdarzyć, że lecąc na niskim pułapie w strefie wysokiego ciśnienia atmosferycznego, altimetr ustawiony na QNE pokaże wartości ujemne. Wysokość mierzona względem ciśnienia 1013,2 hPa określana jest również jako FL (Flight Level).

W tej części artykułu nie za wiele było o czystej elektronice i niestety nie da się już tego nadrobić. Zaległości nadgonimy w drugiej części, do lektury której już teraz serdecznie wszystkich zapraszam.

Jarosław Doliński
jaroslaw.dolinski@ep.com.pl

<http://www.first-to-fly.com/History/Wright%20Story/wright%20story.htm>
<http://www.szybowce.enter.net.pl/instrum/instrum.htm>