



## Amatorskie pomiary meteorologiczne: fotometr słoneczny

Krzysztof MARKOWICZ\*

W ostatnich latach powszechny dostęp do komputerów oraz czujników parametrów środowiskowych przyczynił się do rozwoju amatorskich pomiarów meteorologicznych. Na świecie istnieje obecnie wiele sieci zrzeszających ludzi w różnym wieku, którzy fascynują się zjawiskami meteorologicznymi. Prowadzą oni różne pomiary atmosferyczne, począwszy od prostych obserwacji stanu atmosfery, takich jak temperatura, wilgotność, wiatr lub opad, a skończywszy na systemach lokalizacji wyładowań atmosferycznych czy pomiarach zanieczyszczeń powietrza. Część z nich kupuje proste przyrządy meteorologiczne, a pozostali budują własne urządzenia pomiarowe. Celem tej serii artykułów będzie właśnie zachęcenie Czytelników do własnoręcznego wykonania kilku przyrządów umożliwiających interesujące pomiary meteorologiczne.

W pierwszym odcinku zajmiemy się budową i działaniem fotometru słonecznego. Jest on przyrządem służącym do pomiaru bezpośredniego promieniowania słonecznego, czyli promieniowania pochodzącego z obszaru tarczy słonecznej. Promieniowanie słoneczne, przechodzące przez atmosferę, jest stopniowo osłabiane wskutek procesów absorpcji i rozpraszania: na molekułach gazów atmosferycznych (głównie tlenu, azotu i pary wodnej), w chmurach oraz na zanieczyszczeniach powietrza zwanych aerozolami. Jeżeli w okolicach tarczy słonecznej nie ma chmur, to natężenie promieniowania bezpośredniego docierającego do powierzchni Ziemi jest tym większe, im mniej zanieczyszczeń zawiera pionowa kolumna atmosfery (inaczej: powietrze jest bardziej przezroczyste). Relacje te opisuje prawo Lamberta–Beera:

$$I(\lambda) = I_{\text{od}}(\lambda)e^{-m\tau(\lambda)},$$

gdzie  $I(\lambda)$  jest natężeniem promieniowania słonecznego o długości fali  $\lambda$  dochodzącego do fotometru,  $I_{\text{od}}(\lambda)$  jest natężeniem promieniowania słonecznego dochodzącego do górnych granic atmosfery (tzw. spektralna stała słoneczna),  $m$  oznacza tzw. masę optyczną atmosfery,  $\tau$  zaś tzw. grubość optyczną atmosfery. Ponieważ stała słoneczna zależy od chwilowej odległości  $d$  między Ziemią a Słońcem, wprowadza się pojęcie stałej słonecznej  $I_0(\lambda)$  dla średniej odległości  $d_0$  Ziemia–Słońce. Zapisane przy użyciu tych wielkości prawo Lamberta–Beera przyjmuje postać

$$I(\lambda) = I_0(\lambda) \left( \frac{d_0}{d} \right)^2 e^{-m\tau(\lambda)}.$$

Stosunek kwadratów średniej i chwilowej odległości Ziemia–Słońce można wyrazić przybliżonym wzorem

$$\left( \frac{d_0}{d} \right)^2 = 1 + \left[ 0,034 \cos \left( 2\pi \frac{D}{365} \right) \right],$$

gdzie  $D$  oznacza numer kolejnego dnia w roku.

*Masa optyczna* atmosfery jest wielkością bezwymiarową, zdefiniowaną przez stosunek całkowitej masy kolumny powietrza (o jednostkowej powierzchni), nachylonej w kierunku Słońca, do masy pionowej kolumny powietrza. Uwzględnia ona fakt, że gdy Słońce znajduje się nisko nad horyzontem (mówimy: ma mały kąt elewacyjny), promieniowanie słoneczne pokonuje dłuższą drogę w atmosferze. W przypadku, gdy kąt elewacyjny Słońca jest większy od  $30^\circ$ , masa optyczna atmosfery może być wyznaczana z przybliżenia płaskorównoległego i wynosi

$$m = \frac{1}{\sin(\alpha)}.$$

Dla kątów elewacyjnych mniejszych od  $30^\circ$  efekt zakrzywienia powierzchni Ziemi staje się istotny i wówczas masa optyczna wyraża się wzorem

$$m = \frac{1}{\sin(\alpha) + a(\alpha \cdot 180/\pi + b)^{-c}},$$



\*Instytut Geofizyki, Wydział Fizyki,  
Uniwersytet Warszawski

gdzie  $\alpha$  jest kątem elewacyjnym Słońca w radianach, stałe  $a$ ,  $b$  i  $c$  zaś przyjmują wartości:

$$a = 0,50572, \quad b = 6,07995, \quad c = 1,6364.$$

Gdy Słońce znajduje się na horyzoncie, masa optyczna wynosi około 38, co oznacza, że promieniowanie przechodzi trzydziestoosmiokrotnie dłuższą drogę, niż gdyby Słońce było w zenicie.



Grubość optyczna atmosfery jest również wielkością bezwymiarową. Jest ona proporcjonalna – w pionowej kolumnie powietrza – do osłabienia bezpośredniego promieniowania słonecznego wskutek procesów absorpcji i rozpraszania (ekstynkcji). Całkowita grubość optyczna atmosfery może być wyrażona poprzez sumę grubości optycznej związanej z aerozolami  $\tau_{AOT}$ , molekułami powietrza (rozpraszanie Rayleigha)  $\tau_{RAY}$ , parą wodną  $\tau_{H_2O}$  i innymi gazami śladowymi (np. ozonem)  $\tau_g$

$$\tau = \tau_{AOT} + \tau_{RAY} + \tau_{H_2O} + \tau_g.$$

Przekształcając powyższe wzory, widzimy, że grubość optyczna aerozolu może być wyznaczona na podstawie pomiarów promieniowania bezpośredniego z zależności

$$\tau_{AOT} = \frac{1}{m} \left[ \ln \frac{I_0}{I} + 2 \ln \frac{d}{d_0} \right] - (\tau_{RAY} + \tau_{H_2O} + \tau_g).$$

W przypadku promieniowania słonecznego w zakresie widzialnym i bliskiej podczerwieni wpływ pary wodnej i ozonu jest na ogół zanedbywalnie mały (poza wąskimi pasmami absorpcyjnymi). Największy wkład do grubości optycznej wnoszą rozpraszanie i absorpcja aerozolu oraz rozpraszanie molekularne. Wyznaczenie grubości optycznej aerozolu wymaga zatem obliczenia grubości optycznej związanej z rozpraszaniem Rayleigha. Wielkość ta zmniejsza się z długością fali jak  $\lambda^{-4}$  (co, nawiasem mówiąc, sprawia, że nieboskłon pozbawiony chmur ma kolor niebieski). Molekularne grubości optyczne wynoszą 0,61, 0,14 oraz 0,008 dla długości fali odpowiednio 350, 500 oraz 1000 nm. W celu wyznaczenia grubości optycznej związanej z rozpraszaniem na molekułach powietrza stosuje się empiryczny wzór

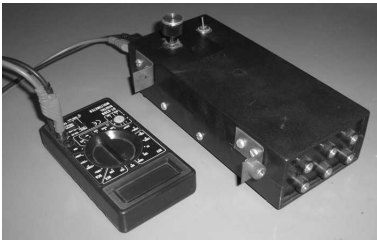
$$\tau_{RAY} = \frac{p}{p_0} (A\lambda^{-4} + B\lambda^{-5} + C\lambda^{-6}),$$

gdzie  $p$  jest ciśnieniem atmosferycznym w hPa,  $\lambda$  długością fali w  $\mu\text{m}$ , a pozostałe stałe przyjmują wartości:

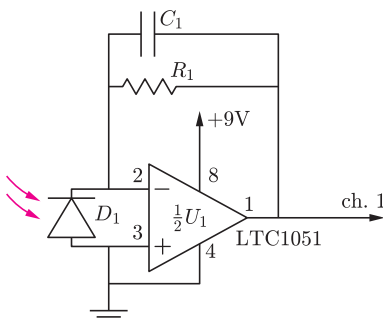
$$p_0 = 1013 \text{ hPa},$$

$$A = 8436 \cdot 10^{-6} \mu\text{m}^4, \quad B = -1225 \cdot 10^{-7} \mu\text{m}^5, \quad C = 14 \cdot 10^{-5} \mu\text{m}^6.$$

W przypadku aerozolu typowe wartości grubości optycznej mierzonej w Polsce zmieniają się w zakresie od 0,1 do 0,5 dla fali o długości 500 nm. Wyznaczenie grubości optycznej dla aerozoli, a tym samym zmierzenie ilości zanieczyszczeń w powietrzu, wymaga zmierzenia natężenia promieniowania bezpośrednio docierającego do powierzchni Ziemi. Jednymi z najprostszych detektorów promieniowania są fotodiody, jednak stosowanie ich w przypadku fotometru słonecznego wymaga użycia dość kosztownych filtrów interferencyjnych, pozwalających na pomiar promieniowania w wąskim zakresie długości fali. Znacznie prostszym i tańszym rozwiązaniem jest wykorzystanie zwykłych diod LED jako detektorów promieniowania. Diody te w porównaniu z fotodiodami mają znacznie węższy zakres czułości widmowej, wynoszący na ogół około 50–70 nm. Jest to wartość większa niż w przypadku komercyjnych fotometrów (około 10 nm), pozwala jednak na uzyskiwanie zadowalających wyników pomiarowych. Układ pomiarowy naszego fotometru będzie składał się z konwertera prąd-napięcie realizowanego przez układ operacyjny UTC1051. Pozwoli on na pomiar niewielkiego prądu płynącego przez złącze n-p diody LED. Układ pracuje w sprzężeniu zwrotnym za pośrednictwem rezystora o oporności kilku M $\Omega$ . Dokładna wartość oporu zależy od typu diody LED i ustala się ją podczas pomiarów testowych, tak aby wartość napięcia wyjściowego, mierzonego w godzinach południowych, nie przekraczała 2 V. Układ scalony UTC1051



Rys. 1. Zdjęcie fotometru słonecznego.



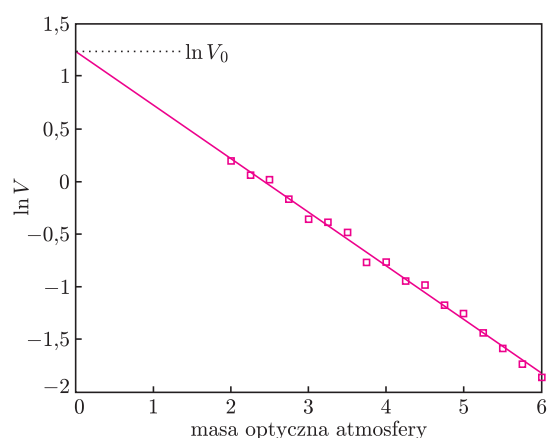
Rys. 2. Schemat elektroniczny podłączenia diody LED do wzmacniacza operacyjnego LTC1051. Oporność rezystora  $R_1$  ustala się eksperymentalnie dla każdej diody. Najczęściej jest to wartość z zakresu 2–5 M $\Omega$ . Pojemność kondensatora  $C_1$  wynosi 220 pF.

Pomiar grubości optycznej aerozolu dla co najmniej dwóch długości fali pozwala oszacować tzw. wykładnik Ångströma związany z rozmiarem cząstek.

ma dwa wzmacniacze operacyjne umożliwiające pomiar dla dwóch diod LED. Zasilamy go napięciem około 9 V z baterii 6LR61. Schemat całego układu elektronicznego pokazany został na rysunku 2. Detektor promieniowania umieszczony jest wewnątrz ciemnej obudowy. Oświetlany jest on przez promieniowanie słoneczne padające przez niewielki otwór w przedniej ścianie. Należy tak dostosować średnicę otworka i odległość diody od niego, aby kąt widzenia diody wynosił około 2–2,5°. Pozwoli to na pomiar promieniowania pochodzącego od tarczy słonecznej (0,5°) i jej najbliższej okolicy. W przyrządzie możemy zastosować kilka diod o różnej długości fali. Najczęściej w fotometrach wykorzystuje się jako detektory diody LED o średnicy 5 mm koloru żółtego, zielonego oraz czerwonego.

Napięcie  $V$ , mierzone za pomocą podłączonego do fotometru miernika uniwersalnego, jest proporcjonalne do natężenia promieniowania słonecznego  $I$ . Grubość optyczną aerozolu możemy zatem wyznaczyć ze wzoru

$$\tau_{\text{AOT}} = \frac{1}{m} \left[ \ln \frac{V_0}{V} + 2 \ln \frac{d}{d_0} \right] - \tau_{\text{RAY}},$$



Rys. 3. Kalibracja metodą Langleya. Kwadraty reprezentują wyniki pomiarów, natomiast linia ciągła przedstawia dopasowanie do punktów pomiarowych. Przecięcie prostej z osią pionową odpowiada wartości kalibracyjnej  $\ln V_0$ .

gdzie  $V_0$  oznacza wartość napięcia, jaką wskazywałby przyrząd wyniesiony poza granice atmosfery. Nie mogąc tego ostatniego zrobić w warunkach domowych, potrafimy jednak wyznaczyć  $V_0$  podczas kalibracji przyrządu przy użyciu tzw. techniki Langleya, polegającej na wykonywaniu wielokrotnych pomiarów w odstępach 10–15 minut dla kątów elewacyjnych Słońca pomiędzy 10° a 30°. Najczęściej czas ten odpowiada 2–3 godzinom zaczynającym się około 30 minut po wschodzie lub kończącym się około 30 minut przed zachodem Słońca. Kalibracja wymaga bezchmurnego nieba i stabilnych warunków meteorologicznych, aby grubość optyczna atmosfery nie zmieniała się w czasie. Wówczas logarytm mierzonego napięcia (w dowolnych ustalonych jednostkach, np. w voltach) jest liniową funkcją masy optycznej atmosfery  $m$

$$\ln V = \ln V_0 + 2 \ln \left( \frac{d_0}{d} \right) - m\tau.$$

Wykonana na podstawie pomiarów ekstrapolacja zależności liniowej do zerowej masy optycznej (zob. rys. 3) pozwala wyznaczyć poszukiwaną wartość  $\ln V_0$  (w tych samych jednostkach).

Wyznaczenie grubości optycznej aerozolu wymaga jeszcze znajomości długości fali, dla której dioda LED wykazuje najwyższą czułość, oszacowania ciśnienia atmosferycznego oraz wyznaczenia położenia Słońca nad horyzontem.

W przypadku długości fali możemy posłużyć się informacjami technicznymi na temat danej diody LED. Producenci na ogół podają widmo lub długość fali odpowiadającą maksymalnej emisji promieniowania. Widma emisyjne i absorpcyjne diody LED na ogół nie pokrywają się dokładnie, jednak w naszym przypadku przyjęcie wartości dla widma emisyjnego nie prowadzi do dużych błędów. Aby wyznaczyć położenie Słońca, możemy wykorzystać dostępne w internecie programy, np. na stronie

<http://www.igf.fuw.edu.pl/meteo/stacja/kody.php>.

Pomiary fotometrem wykonuje się jedynie w dni słoneczne, kiedy tarczy słonecznej nie przesłaniają chmury. W atmosferze występują czasami cienkie chmury typu cirrus, które są słabo widoczne blisko tarczy słonecznej.

Mogą one jednak istotnie wpływać na wyniki pomiaru, dlatego podczas każdego pomiaru należy uważnie obserwować zachmurzenie. Sam pomiar powinien trwać około 20–30 sekund, w czasie których ustawiamy fotometr w kierunku tarczy Słońca i obserwujemy wskazania napięcia elektrycznego. Wybieramy wartość maksymalną, odpowiadającą najlepszemu ustawieniu fotometru.

Tyle dobrych rad. Teraz pozostaje tylko życzyć Czytelnikom wiele satysfakcji podczas budowy przyrządu oraz udanych pomiarów.



#### Rozwiązanie zadania M 1275.

Zauważmy, że

$$\begin{aligned} x_1x_2 + x_2x_3 + \dots + x_{99}x_{100} &< \\ &< (x_1 + x_3 + \dots + x_{99}) \times \\ &\times (x_2 + x_4 + \dots + x_{100}) \leq \\ &\leq \left( \frac{x_1 + x_2 + \dots + x_{100}}{2} \right)^2 = \frac{1}{4}. \end{aligned}$$