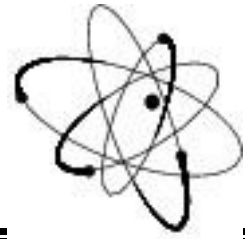




**Akademia Górniczo-Hutnicza
im. Stanisława Staszica w Krakowie**



Wydział Fizyki i Informatyki Stosowanej

Praca magisterska

Łukasz Jankowski

kierunek studiów: **fizyka techniczna**

specjalność: **fizyka środowiska**

Modernizacja obsługi automatycznej stacji meteorologicznej

opiekun: **dr inż. Mirosław Zimnoch**

Kraków, październik 2006

Spis treści

1. Rozdział 1 Wstęp.....	6
2. Rozdział 2 Automatyczne stacje meteorologiczne.....	8
2.1. Zalety.....	8
2.2. Zastosowania.....	10
2.3. Budowa i metody pomiaru.....	13
2.3.1. Temperatura.....	15
2.3.2. Ciśnienie.....	18
2.3.3. Wilgotność.....	18
2.3.4. Kierunek i prędkość wiatru.....	19
2.3.5. Opad atmosferyczny.....	20
3. Rozdział 3 Przetwarzanie zebranych danych do celów prezentacyjnych....	25
3.1. Dotychczasowe problemy i metody ich rozwiązania.....	25
3.2. Przetwarzanie danych i generowanie wykresów.....	29
3.2.1. Rola bazy RRD.....	29
3.2.2. Generowanie wykresów i wyszukiwanie skrajnych wartości.....	31
3.2.3. Dodatkowe obliczenia.....	32
3.3. Kontrola pracy systemu komputerowego.....	33
3.3.1. Logowanie zdarzeń.....	33
3.3.2. Raportowanie zdarzeń.....	35
4. Rozdział 4 Administrowanie systemem komputerowym.....	37
4.1. Uwagi ogólne.....	37
4.2. Oprogramowanie używane przez aplikację.....	37
4.3. Konfiguracja środowiska.....	38
4.4. Odtwarzanie wykresów.....	40
5. Rozdział 5 Prezentacja wyników pomiarów wykonywanych przez stację....	42
5.1. Strona internetowa.....	42
5.1.1. Ogólna charakterystyka budowy.....	42
5.1.2. Szczegółowy opis budowy.....	44
5.1.3. Zawartość witryny - część ogólnodostępna.....	49
5.1.4. Zawartość witryny - panel administracyjny.....	53
5.2. Kanał RSS.....	54
5.2.1. Zawartość.....	54

5.2.2. Sposób korzystania.....	55
5.2.3. Budowa.....	56
5.2.4. Analiza czytelności.....	56
5.3. Bot komunikatorowy.....	58
5.3.1. Możliwości bota i instrukcje dotyczące sposobu korzystania.....	58
5.3.2. Budowa.....	59
5.3.3. Kontrola wykorzystywania przez użytkowników.....	59
5.4. Amatorski Monitoring Temperatury.....	60
6. Rozdział 6 Analiza statystyczna danych pomiarowych z wykorzystaniem stworzonego oprogramowania.....	62
7. Rozdział 7 Podsumowanie.....	67
8. Rozdział 8 Literatura.....	69

Rozdział 2

Automatyczne stacje meteorologiczne

2.1. Zalety

Wykorzystanie automatycznych stacji meteorologicznych (ASM) jest obecnie coraz powszechniejsze ze względu na znaczną przewagę, jaką mają nad stacjami tradycyjnymi.

Ich zasadniczą przewagą jest możliwość pracy przez dłuższy czas bez nadzoru - niezbędne czynności osób je obsługujących sprowadzają się jedynie do wizyt w celu zebrania danych, naprawy lub rutynowej kontroli. Oznacza to uwolnienie człowieka od codziennych czynności typowych dla tradycyjnej stacji - odczyty pomiarów, wprowadzanie ich do komputera, opróżnianie deszczomierzy, a to wszystko również w godzinach nocnych. Wpływa to więc w dużym stopniu na ograniczenie kosztów. Ograniczona do minimum konieczność wizyt w miejscu pomiarów jest szczególnie istotna w rejonach trudnodostępnych, o ekstremalnych lub niebezpiecznych warunkach środowiskowych.

Rejestracja, przetwarzanie i przekazywanie danych dzieje się automatycznie i znacznie szybciej niż sposobami tradycyjnymi, a jednocześnie procesy te pozbawione są subiektywnych błędów będących efektem tzw. czynnika ludzkiego. Pomiaru wykonywane są z większą dokładnością i zawsze tą samą precyzją, może być mierzonych wiele parametrów meteorologicznych jednocześnie, a dane zbierane są w sposób ciągły przy dowolnym, również dowolnie krótkim kroku czasowym. Pozwala to rejestrować więcej szczegółów, obserwować szybkozmienne zjawiska pogodowe.

Automatyczny system pomiarowy i otrzymywanie wyników w formie cyfrowej pozwalają na natychmiastową ich publikację oraz udostępnianie, co jest kluczową kwestią przy prognozowaniu pogody oraz minimalizacji skutków klęsk żywiołowych, takich jak tornada, czy powódzie. Dzięki wykorzystaniu sieci Internet pomiary mogą być dostępne dla użytkowników znajdujących się na drugim krańcu globu. Ich cyfrowa postać pozwala na dowolne przetwarzanie, oprócz pomiaru parametrów podstawowych można wyznaczać wielkości dodatkowe, których uzyskiwanie jest czasochłonne lub niemożliwe przez obserwatora (np. intensywność opadu, dowolne wartości średnie, dokładne czasy wystąpienia wartości ekstremalnych) oraz wielkości pochodne (np. temperatura punktu rosy, temperatura odczuwalna). Możliwa zaawansowana analiza statystyczna danych dostarcza znacznie więcej dodatkowych informacji o pogodzie, pozwala pełniej wykorzystać wykonywane pomiary. Stacje automatyczne realizują automatycznie złożone procedury oceny jakości danych, stanu technicznego aparatury, sygnalizują awarie, dzięki temu zapewniając znacznie lepszą kontrolę jakości pomiarów.

Automatyzacja pomiarów niesie ze sobą jednocześnie pewne dodatkowe wymagania. Stosowane w stacjach układy pomiarowe muszą mieć odpowiednie parametry umożliwiające pracę bez nadzoru przez ustalony czas. By wyniki były porównywalne niezbędna jest racjonalizacja i ujednoczenie algorytmów przetwarzania danych stąd wprowadzane procedury unifikacji dotyczące stosowanych przyrządów i procedur pomiarowych. Zbierane w celach synoptycznych dane muszą być zgodne z wymaganiami *WMO (World Meteorological Organization)* oraz kompatybilne ze stacjami obsługowymi. Producenci urządzeń automatycznych niekiedy nie dostarczają szczegółowych informacji dotyczących zastosowanych czujników i układów elektronicznych, jak też algorytmów przetwarzania, a takie wiadomości często mogą pomóc w zrozumieniu obserwowanych przesunięć i anomalii w wynikach.

2.2. Zastosowania

ASM wykorzystuje się wszędzie tam, gdzie istotne i potrzebne jest regularne rejestrowanie wartości parametrów meteorologicznych i znajomość warunków pogodowych, gdzie ważne jest ciągle kontrolowanie parametrów, które są przez te układy mierzone.

Rola systemów automatycznych jest szczególnie duża na obszarach bezludnych, o ekstremalnych warunkach środowiskowych lub klimatycznych, jak pustynie, obszary podbiegunowe, wysokie góry, gdzie stacje często bywają jednorazowego użytku, a możliwość zdalnego dostępu do rejestrowanych informacji jest podstawową zaletą.



Rysunek 1: Automatyczne stacje meteorologiczne wykorzystywane są w niesprzyjającym klimacie, trudnodostępnych miejscach.

Układy takie wykorzystywane są jako pojedyncze stacje pomiarowe lub komponenty mezoskalowych automatycznych sieci pomiarowych. Gromadzone przez nie dane mogą stanowić podstawę badań naukowych oraz długoterminowego monitoringu. Stacje automatyczne są więc składnikami sieci monitoringu wód, gleb, powietrza (np. jakości powietrza miejskiego). W oparciu o takie sieci pomiarowe działają wszelkie systemy wczesnego ostrzegania, np. przeciwlawinowego,

przeciwpowodziowego, przed osuwiskami, pożarami, kumulacją skażeń. Sieci stacji meteorologicznych są podstawą działania systemów osłony lotnisk, opracowywania prognoz pogody.

Powstające bazy danych pozwalają realizować różnorodne projekty badawcze z zakresu meteorologii, klimatologii, hydrologii, oceanologii oraz mogą być wykorzystywane w rolnictwie, sadownictwie, leśnictwie, hodowli. Informacje o warunkach środowiskowych, zwłaszcza atmosferycznych, pomagają właściwie zorganizować działania w celu maksymalnej efektywności i zminimalizowania strat, często silnie zależnych od pogody. W wielu dziedzinach przemysłu (spożywczym, farmaceutycznym), transporcie obowiązuje System Zapewnienia Jakości. Składają się na niego m.in. HACCP (ang. *Hazard Analysis and Critical Control Point - Analiza Zagrożeń i Krytycznych Punktów Kontroli*), dyrektywy unijne, prawo farmaceutyczne, systemy jakościowe ISO, systemy jakościowe tzw. „Dobre Praktyki...” np. Dobra Praktyka Produkcyjna (*GMP - Good Manufacturing Practice*), itp. Do spełnienia tych norm i dyrektyw stosuje się układy automatyczne nadzorujące działanie systemów, urządzeń przez pomiar warunków środowiskowych, ich parametrów technicznych (np. warunki hodowli gospodarczych, upraw rolniczych, temperatura i wilgotność panujące w magazynach, halach czy serwerowniach). W dokumentach tych stanowi się (między innymi), że klimat (temperatura i wilgotność) pomieszczeń wykorzystywanych do produkcji i magazynowania musi być mierzony, a wyniki pomiaru trwale rejestrowane przy pomocy termografów i higrografów, a więc przyrządów rejestrujących bezpośrednio na papierze (z datą i czasem rejestracji) lub (w nowocześniejszej i wygodniejszej wersji) poprzez elektroniczny zapis, a następnie odczyt zarchiwizowanych danych pomiarowych w systemie komputerowym. Oprócz zainstalowania klimatyzatorów, niezbędne jest więc zainstalowanie niezależnego systemu monitorującego klimat. Nie można bowiem do tego celu wykorzystać mierników stanowiących element składowy klimatyzatorów czy agregatów chłodniczych, ponieważ w przypadku ich awarii użytkownik nie będzie posiadał niezależnego powiadomienia o zaistnieniu zagrożenia klimatycznego. Właściwe warunki pracy decydują o efektywności, wydajności produkcji, zużyciu energii, bezpieczeństwie. Do kontroli warunków wewnątrz budynków potrzebne są również informacje o warunkach zewnętrznych - umożliwia to ekonomiczne i sprawne działanie systemów grzewczych, klimatyzacyjnych.

Podejmowanie decyzji o budowie obiektów, gdzie decyzja o lokalizacji ma krytyczne znaczenie, musi być poprzedzone długotrwałymi pomiarami i ich analizą, gdyż może zaważyć o powodzeniu przedsięwzięcia (np. elektrownia wiatrowa), jak również może mieć wpływ na zdrowie okolicznej ludności (np. fabryka emitująca szkodliwe pyły). Wszelkie inwestycje wymagają kontroli parametrów środowiskowych w otoczeniu i zmian, jakie mogą wywołać. Znajomość warunków atmosferycznych ważna jest też przy uprawianiu wielu dyscyplin sportowych - lotnictwo, baloniarstwo, golf, wyścigi samochodowe. W pobliżu obiektów i terenów przeznaczonych do ich uprawiania prowadzone są automatyczne stacje będące źródłem informacji o lokalnych warunkach pogodowych, użyteczne np. podczas organizacji zawodów sportowych. A sama tak dokładna obserwacja i rejestrowanie pogody jest też wspaniałym hobby.

ASM to również potencjalnie bardzo użyteczne narzędzie edukacyjne - umożliwiające aktywne, zintegrowane uczenie się, zdobywanie różnorodnych umiejętności i szerokiej wiedzy o świecie. W wielu krajach ASM stają się popularną i chętnie stosowaną pomocą naukową, a zbierane dane - podstawą do tworzenia różnych, również międzynarodowych, programów i projektów edukacyjno-badawczych.

Współczesne ASM budowane są w wielu odmianach przez różne firmy, z elementów wysokiej jakości, z zastosowaniem najnowszych rozwiązań technicznych, elektroniki mikroprocesorowej i miernictwa cyfrowego. Są one kompaktowe, odporne na warunki zewnętrzne, łatwe w instalacji i obsłudze; często są też dostępne w wersji bezprzewodowej, wyposażone w dodatkową antenę umożliwiającą komunikację ze stacją na dużej odległości. Mają niewielki pobór mocy, mogą być zasilane bateriami, najczęściej również słonecznymi. Dostępne są w wielu modelach, układach, często dostosowanych do konkretnych zastosowań i wymagań, ale jest możliwe ustawianie własnej konfiguracji czujników. Stacje mają proste oprogramowanie, umożliwiające jednocześnie zaawansowaną analizę danych i własne ustawienia programowe.

2.3. Budowa i metody pomiaru

Ogromny rozwój techniki wytwarzania układów cyfrowych sprawił, że zaczęto je stosować również w stacjach meteorologicznych. Wprowadzenie przyrządów cyfrowych zrewolucjonizowało dotychczasowe metody wykonywania pomiarów. Oprócz mierzenia wyznaczonych wielkości fizycznych potrafią one na podstawie zaprogramowanych algorytmów automatycznie wyznaczać wielkości pochodne, wewnętrzne źródła sygnałów wzorcowych służą do równoległej korekcji jakości danych, dzięki czemu realizowany jest wstępny program kontroli wyników pomiarów i obliczeń. Tak zweryfikowane dane są gromadzone i przesyłane dalej. Prowadzony jest monitoring parametrów bezpośrednio mierzonych i pochodnych pod kątem jakości danych i w razie niezgodności redagowane są automatyczne komunikaty ostrzegawcze, wysyłane sygnały alarmowe. Realizowane jest automatyczne formatowanie i wysyłanie komunikatów i meldunków [1].

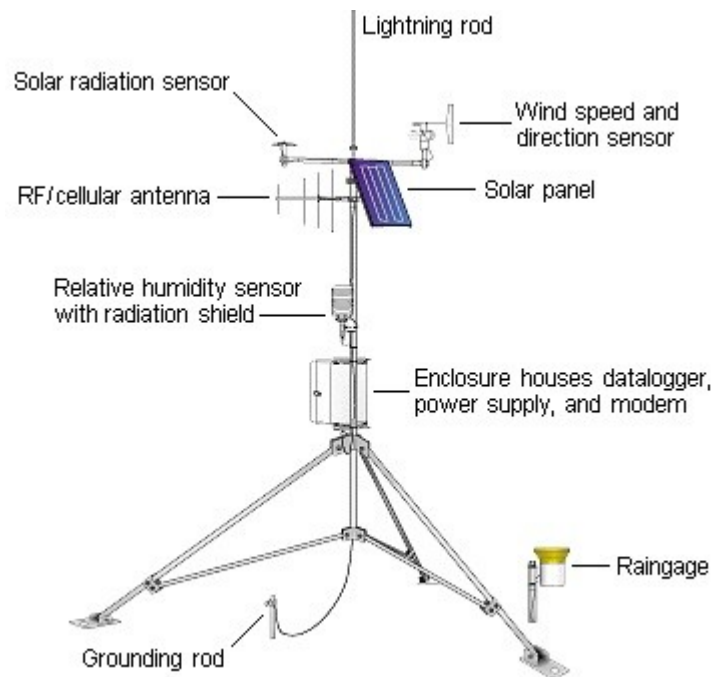
Większość stacji wyposażona jest w następujące podzespoły:

- przyrządy pomiarowe
- układy rejestrujące
- układy wizualizacji i transmisji

Dodatkowymi elementami mogą być układy:

- zasilania
- ogrzewania wybranych czujników
- odgromowe oraz przetworniki, stabilizatory napięć i sieciowe zabezpieczenia przepięciowe

Stacje automatyczne powinny mieć kompaktową konstrukcję, odpowiednią obudowę, możliwie niewielkie rozmiary i ciężar oraz wykazywać odporność na wstrząsy mechaniczne, warunki klimatyczne, wibracje, co jest ważne np. przy transporcie.



Rysunek 2: Klasyczna budowa automatycznej stacji meteorologicznej.

Specjalnym typem stacji są coraz popularniejsze stacje o nadzwyczaj kompaktowej budowie, małe i proste w obsłudze, idealne do zastosowań hobbystycznych. Można je instalować we własnym ogrodzie bądź na dachu domu. Charakteryzuje je ponadto:

- duża dokładność pomiarów
- cyfrowa transmisja, centralny odczyt
- cyfrowa rejestracja wyników pomiarów (zabezpieczona przed niepowołaną ingerencją użytkownika)
- łatwe przenoszenie wyników pomiarów do komputera PC
- niezawodność przyrządów
- możliwość wymiany dowolnego elementu składowego systemu bez wpływu na pomiary realizowane przez pozostałe elementy systemu
- prostota obsługi i instalacji
- sygnalizacja wystąpienia stanów awaryjnych urządzeń

Zaliczana do tego rodzaju stacja *Huger WMR918* wykorzystana została w tej pracy.



Rysunek 3: Komponenty stacji Huger WMR918.

Opisana teraz zostanie budowa czujników wykorzystywanych w tego typu stacjach do pomiaru najważniejszych parametrów meteorologicznych.

2.3.1. Temperatura

Do pomiarów temperatury wykorzystuje się fizyczne zjawisko zmiany oporności specjalnego elementu półprzewodnikowego - termistora. Czujniki termistorowe mają dużą czułość i mogą mieć małe wymiary, a ich nieliniowość wskazań łatwo koryguje się układami elektronicznymi czy uwzględnia przy kalibracji. Przeznaczone są one do pomiarów w różnych warunkach - w powietrzu, wodzie, ziemi.

W czujniku wykonanym w postaci platynowego drutu proporcjonalnie do zmiany temperatury ulega zmianie rezystancja:

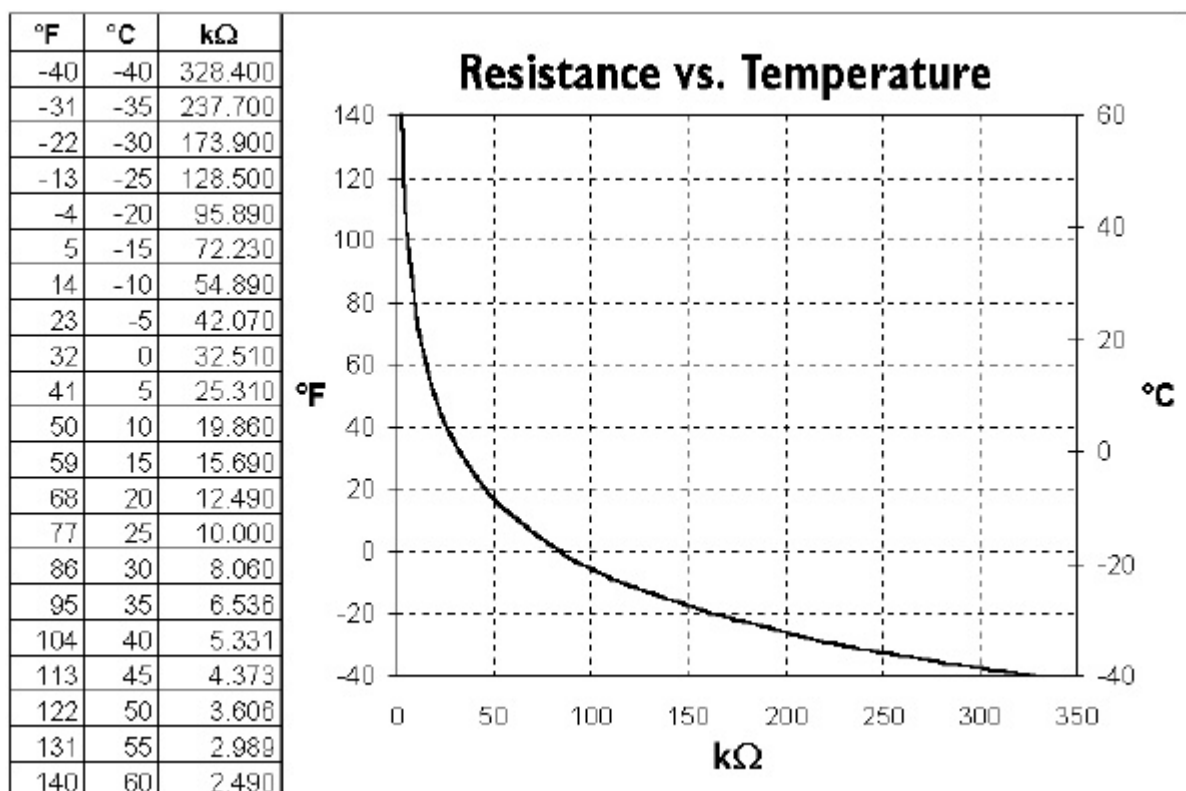
$$\frac{1}{T} = a + b \ln R + c \ln^3 R$$

$$R = \exp \left[\left(\beta - \frac{\alpha}{2} \right)^{\frac{1}{3}} - \left(\beta + \frac{\alpha}{2} \right)^{\frac{1}{3}} \right]$$

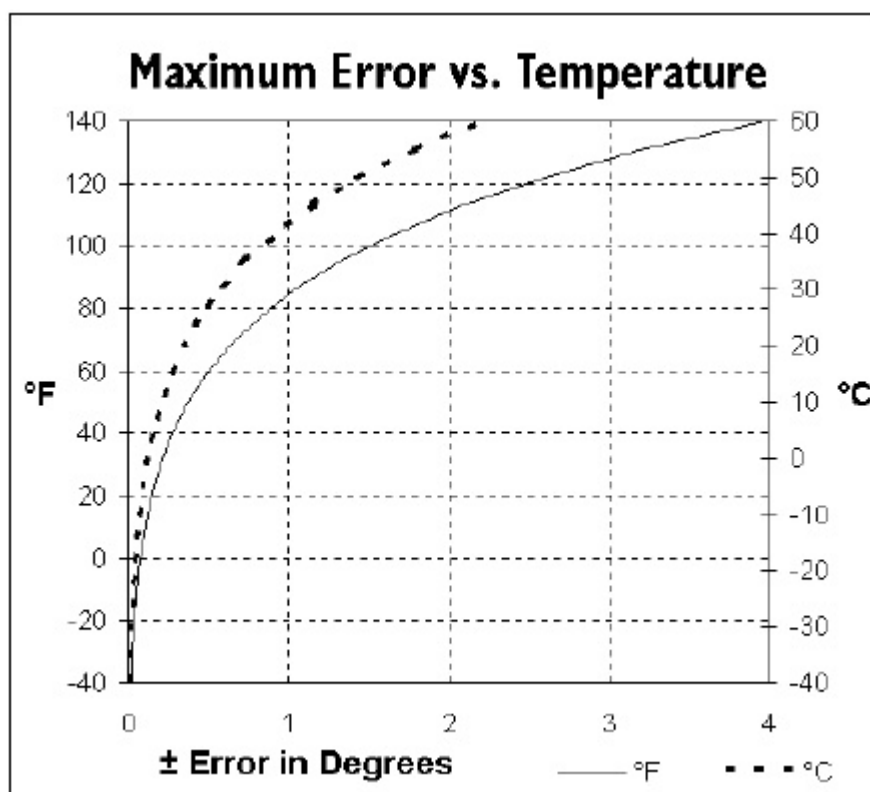
$$\alpha = \frac{a - \frac{1}{T}}{c} \quad \beta = \sqrt{\left(\frac{b}{3c} \right)^3 + \frac{\alpha^2}{4}}$$

dla typowego termistora w temp. 25 °C wartości współczynników są następujące:

$$a = 1.40 \times 10^{-3}, b = 2.37 \times 10^{-4}, c = 9.90 \times 10^{-8}$$



Rysunek 4: Wykres przebiegu zmian rezystancji termistora pod wpływem temperatury [2].



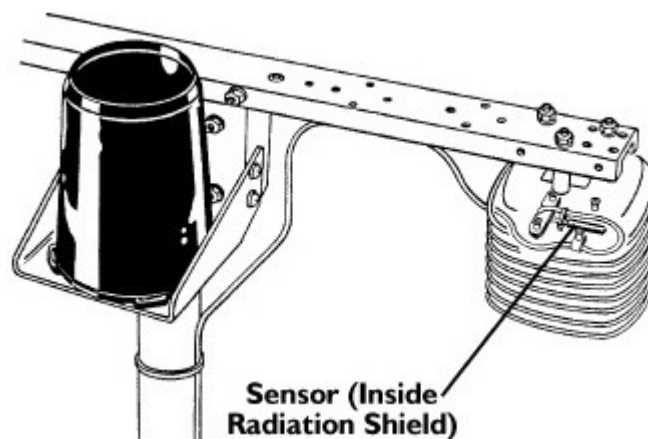
Rysunek 5: Błędy w pomiarze temperatury również uzależnione są od temperatury [2].

Na odchylenie od prawidłowych wartości temperatury w czujnikach półprzewodnikowych mogą mieć również wpływ:

- lokalizacja w pobliżu linii energetycznych
- kładzenie kabli równoległe do przebiegu instalacji elektrycznej wewnątrz budynków
- bliskości dużych metalowych przedmiotów
- długość ewentualnego kabla - około $+0.006\text{ }^{\circ}\text{C}$ na każde 30 m przy $25\text{ }^{\circ}\text{C}$

Trzeba również pamiętać o pewnej bezwładności cieplnej przyrządów, mającej wpływ na interwał czasowy niezbędny do osiągnięcia równowagi termodynamicznej z ośrodkiem. Następuje ona po ok. $100 - 200\text{ s}$ w powietrzu, $10 - 20\text{ s}$ w wodzie [2]. Czas ten zależy od rozmiaru zmian warunków pomiarów oraz od intensywności wymiany ośrodka wokół sondy pomiarowej.

By zapewnić precyzyjne pomiary, czujnik powinien być zabezpieczony przed bezpośrednim wpływem promieni słonecznych i źródeł ciepła specjalną antyradiacyjną obudową (w przypadku braku specjalnej klatki meteorologicznej):



Rysunek 6: Czujnik temperatury zabezpieczony obudową antyradiacyjną [2].

2.3.2. Ciśnienie

W najnowszych typach AWS stosuje się barometry wykonane w formie krzemowych membran zintegrowanych z mikroelektronicznymi układami przetwarzania sygnału w jednym układzie scalonym. Takie krzemowe czujniki uginają się przy zmianie ciśnienia, co jest mierzone tensometrycznie (za pomocą mostków piezoporowych) lub pojemnościowo (za pomocą układów rezonansowych).

2.3.3. Wilgotność

Pojemnościowe higrometry polimerowe, szczególnie wersje wielowarstwowe są obecnie najchętniej stosowane ze względu na swoje najlepsze, w porównaniu z innymi elektrycznymi czujnikami, właściwości - m.in. szybkość działania, liniowość, długookresową stabilność, małą histerezę i małą czułość na temperaturę, dużą odporność na substancje chemiczne. Ich mankamentem jest mała dokładność pomiaru przy wysokich wilgotnościach względnych.

2.3.4. Kierunek i prędkość wiatru

Zasada działania klasycznego wiatromierza jest prosta - napędzane siłą wiatru łopatki wprawiane są w ruch obrotowy, który za pośrednictwem przekładni przekazywany jest silniczkowi. Powstające napięcie jest proporcjonalne do prędkości obrotów.

Jednak obecnie ogromną popularnością cieszą się wiatromierze oparte na wykorzystaniu do pomiaru prędkości i kierunku wiatru ultradźwięków.

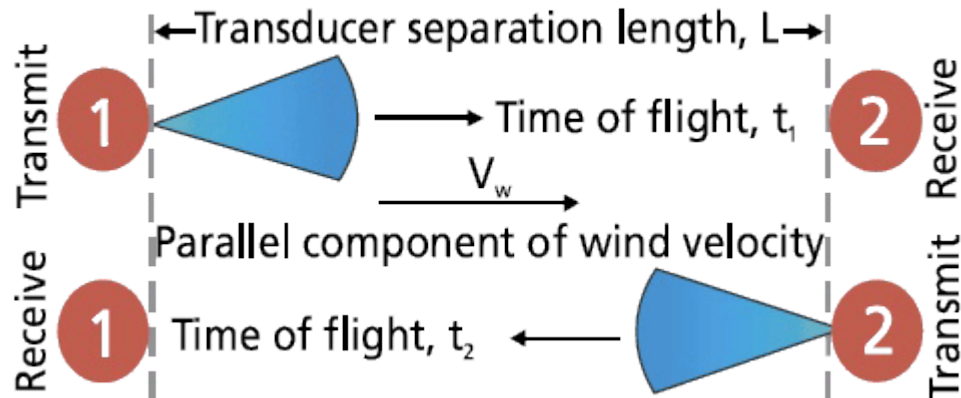


Rysunek 7: Wiatromierze wykorzystujące pomiar prędkości ultradźwięku. Po prawej model dokonujący również pomiarów w kierunkach pionowych [3].

Trójkątna konstrukcja zabezpiecza przed zaburzeniami na drodze pomiaru, zapewnia to precyzyjne pomiary i brak „martwych punktów”. Tego typu rozwiązanie techniczne wolne jest od problemów typowych dla konwencjonalnych wiatromierzy -niezerowa bezwładność, opory tarcia, opóźnienia w początkowej fazie rozruchu. Nie posiada żadnych ruchomych części, nie wymaga kalibracji, ma bardzo niskie zużycie energii.

Do pomiaru prędkości wiatru wykorzystywany jest pomiar prędkości dźwięku. Głowica wiatromierza wyposażona jest w czujniki, a w każdym z nich znajduje się nadajnik i detektor dźwięku. Precyzyjny układ elektroniczny mierzy czasy, jakie są

potrzebne na pokonanie odległości między czujnikami, odpowiednio z wiatrem i pod wiatr.



Rysunek 8: Zasada wyznaczania prędkości wiatru na podstawie dokonywania pomiaru prędkości dźwięku [3].

Przy pomocy prostych obliczeń otrzymuje się wartość równoległej składowej wektora prędkości wiatru:

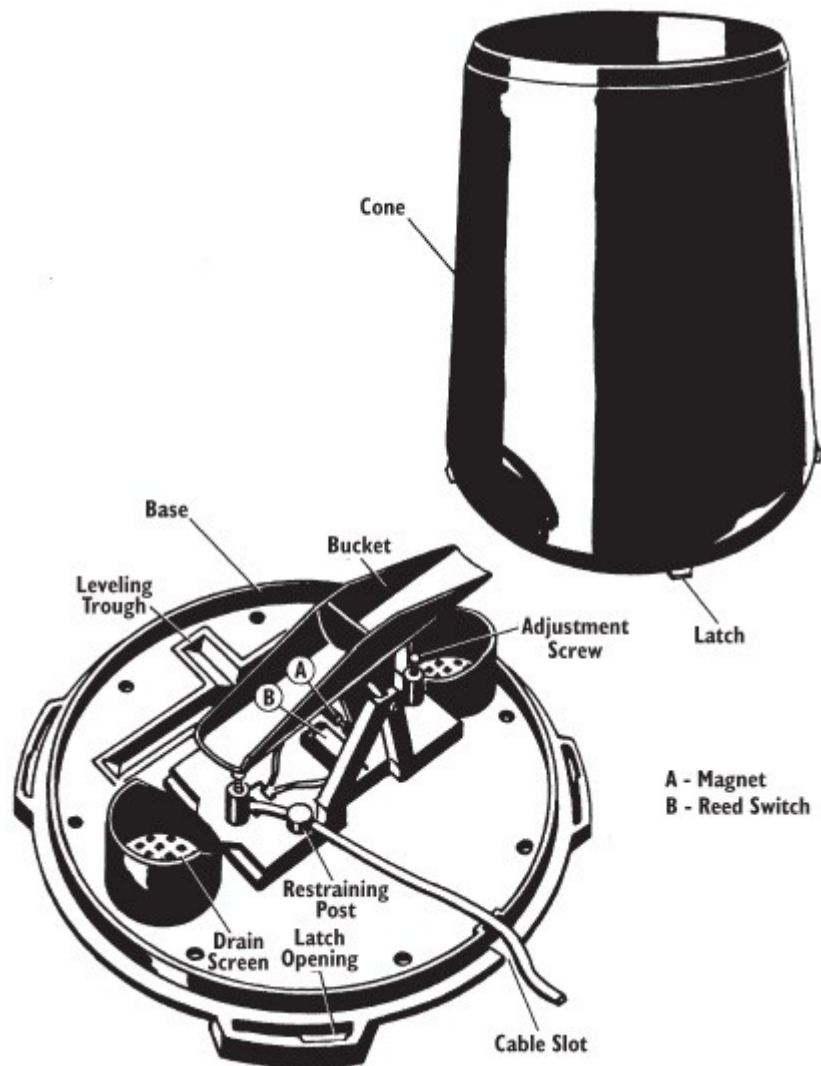
$$\frac{1}{t_1} = \frac{V_s + V_w}{L}$$

$$\frac{1}{t_2} = \frac{V_s - V_w}{L}$$

$$V_w = \frac{L}{2} \left(\frac{1}{t_1} - \frac{1}{t_2} \right)$$

2.3.5. Opad atmosferyczny

Większość deszczomierzy działa na zasadzie gromadzenia kropeł opadu przez czasę zbierającą, która dzięki lejkowatemu kształtowi, wprowadza je do jednej z komór specjalnej kołyski. Gdy komora napetnia się odpowiednią ilością wody, następuje jej przechylenie, pierwsza komora się opróżnia, a druga zajmuje jej miejsce. Podczas zmiany pozycji powstaje sygnał elektryczny, który rejestrowany jest przez stację. Wg wytycznych WMO powinno to nastąpić po zebraniu ilości wody odpowiadającej 2 mm opadu.



Rysunek 9: Budowa klasycznego deszczomierza [2].

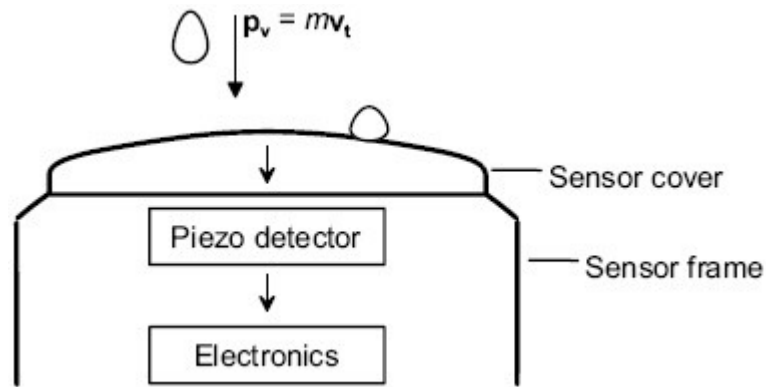
Warto w tym miejscu przedstawić urządzenie WXT510 firmy Vaisala, które oprócz tego że samo w sobie jest kompletną, niesłychanie kompaktową stacją (mierzy najważniejsze parametry - temperaturę, ciśnienie, wilgotność, kierunek i prędkość wiatru oraz opad), reprezentuje zupełnie odmienne podejście do metody mierzenia opadu:



Rysunek 10: Nowatorska konstrukcja automatycznej stacji meteorologicznej [3].

Metoda pomiaru opadu jest interesująca. Polega on na pomiarze siły uderzeń pojedynczych kropeł, dzięki której można dokonać obliczenia ich objętości. W porównaniu do tradycyjnych deszczomierzy, urządzenie to daje bardziej szczegółowe informacje dotyczące opadu. Mierzone są opad całkowity, jego intensywność oraz czas trwania - wszystko w czasie rzeczywistym. Dzięki użytej metodzie nie następuje parowanie ani skraplanie na czujniku.

Wykorzystywane jest tutaj zjawisko akustycznej detekcji uderzeń pojedynczych kropeł. Sygnał powstający na skutek uderzeń jest proporcjonalny do objętości kropeł, i dlatego może być przeliczony na wielkość opadu. Dotyczy to również gradu. Schematyczny diagram czujnika przedstawiony jest na rysunku 11. Jego wierzch wykonany ze stali nierdzewnej przymocowany jest do obudowy czujnika, a piezoelektryczny detektor znajduje się pod spodem. Impulsy prądowe przekazane przez detektor są filtrowane, wzmacniane, zamieniane na postać cyfrową, i ostatecznie analizowane wg wybranych parametrów. Końcowe obliczenia przeprowadzane są przez mikroprocesor.



Rysunek 11: Schemat piezoelektrycznego czujnika w deszczomierzu.

Materiał oraz wymiary detektora zostały wybrane tak, by drgania rezonansowe spowodowane uderzeniem kropli były szybko tłumione. Wielkość powierzchni czujnika jest rezultatem kompromisu pomiędzy przeciwnymi wymaganiami:

- im większa powierzchnia czujnika, tym mniejsze statystyczne wariacje w obliczonej wielkości opadu
- z drugiej strony im większa powierzchnia czujnika, tym bardziej rośnie prawdopodobieństwo uderzenia kilku kropli jednocześnie, które prowadzi do błędnych wyników pomiarów

Kropla uderzająca o powierzchnię czujnika posiada pęd $p = p_v + p_h$, który jest sumą składowych wertykalnej i horyzontalnej. Składowa wertykalna może być zapisana jako $p_v = mv_v = m(v_t + v_{wv})$, gdzie m - masa kropli, v_t - prędkość końcowa kropli, v_{wv} - wertykalna składowa prędkości wiatru. Jednakże zostało wcześniej zanalizowane [4], że wpływ prędkości wiatru w kierunku pionowym jest zanedbywany, wobec czego można przybliżyć, że p_v jest jedynie skutkiem uderzenia: $p_v = m v_t$. Pozioma składowa prędkości wiatru v_{wh} przyczynia się do powstawania poziomej składowej pędu $p_h = m v_{wh}$ i zmienia kąt uderzenia kropli. Ma to ujemny wpływ na wartość pionowej składowej pędu, jednak ze względu iż jest on niewielki, można go skompensować krzywizną wierzchniej

powierzchni czujnika, tak by pozioma składowa była również mierzona podczas uderzeń ukośnych.

Uderzenie kropli generuje na powierzchni czujnika falę elastyczną, która dochodzi do czujnika piezoelektrycznego. Powstające napięcie mechaniczne w materiale piezoelektrycznym powoduje powstanie napięcia elektrycznego w elektrodach czujnika:

$$U(t) = c \frac{dp(t)}{dt}$$

c - stała zależna od materiału piezoelektrycznego

Skutkiem tego na wyjściu czujnika znajduje się pomiar zmiennej w czasie siły uderzenia $dp(t)/dt$, która jest funkcją objętości uderzającej kropli. Ponieważ powierzchnia czujnika jest znana, sygnał pochodzący od kropli może być bezpośrednio zamieniony na wielkość opadu. Wyniki pomiarów omówioną metodą są bardzo zadowalające [5].

Literatura

- [1] Rózdzyński K., *Miernictwo meteorologiczne*, IMGW, Warszawa 1996
- [2] <http://www.davisnet.com>
- [3] <http://www.vaisala.com/>
- [4] Joss, J., and A. Waldvogel, 1977: Comments on „*Some observations on the Joss-Waldvogel rainfall disdrometer*”. *J. Appl. Meteor.*, 16, 112-113
- [5] [http://www.wmo.ch/web/www/IMOP/publications/IOM-82-TECO_2005/Papers/1\(06\)_Finland_4_Salmi.pdf](http://www.wmo.ch/web/www/IMOP/publications/IOM-82-TECO_2005/Papers/1(06)_Finland_4_Salmi.pdf)