

CZYNNIK TECHNOLOGICZNY W AUTOMATYCZNYCH STACJACH METEOROLOGICZNYCH

Grzegorz Benedykt Durło¹, Joanna Kajewska²

¹Katedra Ochrony Lasu i Klimatologii Leśnej, Wydział Leśny, Uniwersytet Rolniczy
Al. 29 listopada 46, 31-425 Kraków
e-mail: rldurlo@cyf-kr.edu.pl

²Zakład Meteorologii i Hydrologii, Instytut Kształtowania i Ochrony Środowiska,
Uniwersytet Przyrodniczy we Wrocławiu
Plac Grunwaldzki 24, 71-353 Wrocław

Streszczenie. W pracy przedstawiono wyniki oceny zastosowania inteligentnych układów mikroprocesorowych tzw. mikrokontrolerów w pomiarach synchronicznych temperatury powietrza na powierzchni doświadczalnej szkółki leśnej Karpackiego Banku Genów w miejscowości Wyrchczadeczka w Beskidzie Śląskim. Analizie poddano sprawność układu sterowania i przetwarzania mikrokontrolera nadzorującego pracę metalowego rezystancyjnego czujnika termometrycznego. Wartości uzyskane z pomiarów automatycznych porównano z wynikami uzyskanymi metodą manualną przy użyciu termometru cieczowego. Przeprowadzone badania miały na celu uzyskanie odpowiedzi na pytanie: czy zmiana metody pomiaru temperatury powietrza musi pociągać za sobą zerwanie jednorodności ciągu klimatologicznego?

Słowa kluczowe: automatyczna stacja meteorologiczna, temperatura powietrza, błąd dynamiczny, termorezystor

WSTĘP

Rozwój i wykorzystanie techniki mikroprocesorowej w miernictwie meteorologicznym spowodowały istotną zmianę w dotychczasowej organizacji naziemnych systemów obserwacyjno-pomiarowych na świecie. Jednym z powodów takiego stanu rzeczy jest stale wzrastające zapotrzebowanie na informację o warunkach meteorologicznych i hydrologicznych szczególnie w zakresie prognozowania synoptycznego i modelowania klimatycznego (Mazurczyk i in. 2001, Rojek i in. 2001, Durło i in. 2005).

Wprowadzenie do powszechnego użycia automatycznych stacji meteorologicznych pociągnęło za sobą szereg konsekwencji, z których najważniejsze to: zmiana metodyki pomiarów oraz sposób formatowania i przesyłania danych. Stosowanie automatycznych układów pomiarowych wymaga zatem szerokiej wiedzy zarówno w zakresie techniki sprzętowej jak i technologii informacyjnej. Obie te dziedziny stanowią podstawę prawidłowej obsługi i konfiguracji układów mikroelektronicznych oraz projektowania systemów telemetrycznych. Jednym z najważniejszych kierunków rozwoju miernictwa meteorologicznego jest optymalizacja rozwiązań w zakresie konstrukcji podzespołów autonomicznego rejestratora danych. Kluczowe dla tych badań jest zrozumienie roli, jaką w systemie pomiarowym odgrywają układy kształtowania i kondycjonowania sygnałów pochodzących z czujników pomiarowych.

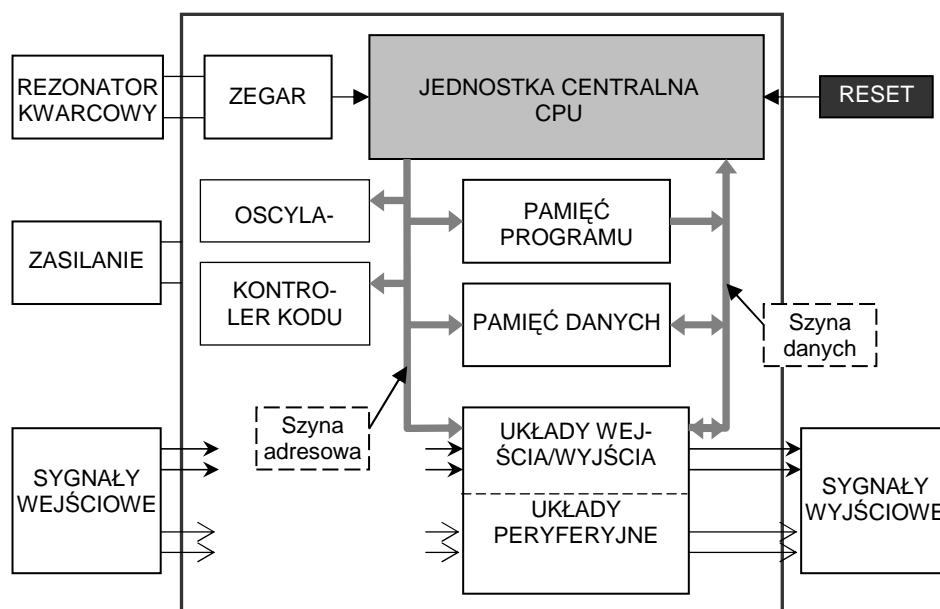
W pracy przedstawiono charakterystykę funkcjonowania bloku sterowania i przetwarzania należącego do automatycznej stacji meteorologicznej typu klimatologicznego firmy Spectrum Technologies opartej na autonomicznym systemie mikroprocesorowym *MicrochipTechnology* z 8 bitową jednostką obliczeniową, 10-bitowym konwerterem A/C typu SAR oraz wewnętrznym oscylatorem dużej precyzji.

Hipoteza badawcza zakłada, iż możliwa jest redukcja błędu wynikającego z różnej bezwładności cieplnej przyrządów elektrycznych (metoda automatyczna) i cieczowych (metoda manualna) do wielkości mniejszej od $0,02^{\circ}\text{C}$ przy dostosowaniu odpowiedniego programu pomiarowego rejestratora sygnałów w automatycznej stacji meteorologicznej.

METODYKA

Na powierzchni doświadczalnej Karpackiego Banku Genów w gminie Istebna, w Beskidzie Śląskim, zainstalowano system pomiarowy zbudowany z sześciu czujników termometrycznych współpracujących z układem pomiarowym opartym na mikrokontrolerze firmy *Microchip Technology* serii *PIC18F2410* o strukturze harwardzkiej (schemat poniżej) współpracującym z 10-cio bitowym multiplekserem A/C oraz transmitterem firmy *Maxim Dallas* na układzie *MAX3228E*. Działanie przyrządu nadzorował 40MHz mikroprocesor zasilany prądem stałym o napięciu 6,0V. Mikrokontroler posiadał 16 Kb pamięci programu typu Flash, 512 bajtów pamięci E²PROM, 512 bajtów ulotnej pamięci SRAM, 32 linie I/O, 32 rejestry, zegar czasu rzeczywistego, trzy zegary pracujące w trybie porównawczym, układ kontroli przerw oraz układ wewnętrznej kontroli wykonania programu typu Watchdog.

Czas pełnego cyklu instrukcji programu wynosił 160 ns. Układ wyposażony był w 13-to kanałowy konwerter analogowo-cyfrowy wykonujący pełny cykl akwizycji w czasie 1,4 μs , oraz cykl konwersji sygnału w czasie 12,0 μs . Komunikacja z jednostką sterującą odbywała się za pomocą interfejsu sprzętowego typu RS232.



Zastosowane w doświadczeniu czujniki temperatury pochodziły z jednej partii przyrządów wyprodukowanych w lutym 2006 roku w fabryce *Spectrum Technologies* w Illinois USA, każdy z nich został opatrzony certyfikatem wzorcowania NIST. Elektryczny czujnik temperatury wraz z kwarcową powłoką izolacyjną miał średnicę 4 mm i długość 12 mm. Wartość błędu systematycznego spowodowanego samopodgrzewaniem (dane producenta) wynosiła $0,0163^{\circ}\text{C}$ przy średniej prędkości przepływu powietrza w osłonie radiacyjnej $2,0 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, stała czasowa każdego z czujników 28 s. Maksymalny błąd pomiaru dla serii czujników wynosił: w temperaturze $0^{\circ}\text{C} \pm 0,08^{\circ}\text{C}$, w $-30^{\circ}\text{C} \pm 0,04$ oraz $0,29^{\circ}\text{C}$ w temperaturze $+30^{\circ}\text{C}$. Każdy z czujników wyposażony był w czteroprzewodową linię doprowadzającą o długości 50 cm, której przewody wykonane były z drutu małej rezystywności i małej przewodności cieplnej. Na całej długości linii przewody znajdowały się w ekranowanej izolacji o oporności $15,0 \text{ M}\Omega$. Każdy czujnik ekspozycyjny był w sześciowarstwowej indywidualnej osłonie radiacyjnej z poliestru odpornego na promieniowanie UV, na wysokości 200 cm nad glebą; elementy osłony były barwione w masie na kolor biały. Zestaw pomiarowy skonfigurowano w trzech cyklach pomiarowych, a każdy cykl realizowany był przez zestaw dwóch termometrów: cykl C1_t1/C1_t2 – próbkowanie 10 sekund, integracja 5 minut; C2_t3/C2_t4 – próbkowanie 30 sekund, integracja 10 minut oraz cykl oznaczony symbolem C3_t5/C3_t6 – próbkowanie 60 sekund, integracja 15 minut.

W przypadku pierwszego, trzeciego i piątego termometru (t_1 , t_3 , t_5) w piątej, dziesiątej oraz piętnastej minucie każdego cyklu zapisywana wartość temperatury stanowiła średnią z 30/20/15 pomiarów chwilowych, w przypadku drugiego, czwartego i szóstego termometru (t_2 , t_4 , t_6) w piątej, dziesiątej oraz piętnastej minucie każdego cyklu zapisywana wartość stanowiła odpowiednik temperatury rejestrowanej w ostatniej sekundzie cyklu pomiarowego. Gromadzone w pamięci rejestratora dane zbierano przy pomocy interfejsu szeregowego typu DB9 do komputera przenośnego CaliforniaAccess7000 model D410S jeden raz na 30 dni. W okresie od 2007-01-01 do 2007-12-31 zgromadzono łącznie 1,2mln danych surowych, 9,7 mln sygnałów zdarzeń rejestrowanych na bramkach układu wejścia oraz 2,5 mln sygnałów weryfikacji kodowania. Obliczanie wskaźników dobowych (średniej dobowej temperatury powietrza) realizowane było w oparciu o wyniki wszystkich pomiarów zgromadzonych w kolejnych cyklach. Okresową kontrolę pracy urządzeń dokonywano przy pomocy cyfrowego miernika VA18B. Program testowy obejmował kontrolę linii napięciowych oraz kontrolę rezystancji układu telemetrycznego. Test wykonywano raz na 3 miesiące w warunkach polowych w miejscu zainstalowania przyrządów (fot. 1). Wyniki testów rejestrowane i zapisywane były w bazie danych archiwum obsługiwanego przez program komputerowy PC-link. Połączenie z bazą danych na komputerze przenośnym realizowane było za pomocą interfejsu USB/RS232 przez port podczerwieni.

Pomiary temperatury powietrza wykonywano równocześnie metodą manualną przy użyciu termometru rtęciowego stacyjnego o stałej czasowej 70 s i dwóch termometrów ekstremalnych rtęciowego i alkoholowego, konstrukcji rurkowej, wyprodukowanych w Kujawskiej Fabryce Termometrów we Włocławku w 2004 roku. Termometr stacyjny umieszczony był na metalowym statywie o wysokości 40 cm. Obok niego, w odległości 15 cm, znajdował się drugi taki sam termometr stacyjny pełniący rolę przyrządu kontrolnego. Termometry ekstremalne umieszczone były na osobnym statywie wykonanym z tworzywa poliwęglanowego w sąsiedztwie termometrów stacyjnych. Wszystkie przyrządy szklane znajdowały się w standardowej drewnianej osłonie żaluzjowej typu angielskiego. Pomiary temperatury ekstremalnej wykonywano z uwagi na konieczność zastosowania wyników w obliczeniu średniej dobowej temperatury powietrza przewidzianej regulaminem pomiarowym stacji meteorologicznych sieci III rzędu. Zestaw standardowy obsługiwanego w dwóch cyklach pomiarowych: cykl S1_t1 - odczyt termometru stacyjnego w trzech terminach obserwacyjnych 06:00, 12:00 i 18:00 GMT (2007-01-01 do 2007-12-31); cykl S2_t2 odczyt termometru stacyjnego co 5 minut przez 72 godziny.



Fot. 1. Stanowisko polowe kontroli pracy układu pomiarowego złożonego z termometrów elektrycznych (po lewej) oraz czujnik rezystancyjny w osłonie radiacyjnej w czasie pomiaru (Durlo 2007)

Photo 1. Field setup for the control of operation of electric thermometers measuring set (left side) and resistance sensor in radiation shield during measurement cycle (Durlo 2007)

W cyklu pomiarowym S2 wybrano po 3 dni w każdym miesiącu (14, 15 i 16 dzień miesiąca), w których wykonywano pomiar co 5 minut zarówno w dzień jak i w nocy przy zamkniętej klatce. Łącznie w 12 seriach wykonano 31 104 obserwacji. Pomiar temperatury ekstremalnej wykonywano raz na dobę w trzecim terminie obserwacyjnym 18:00 GMT. Świadczenia wzorcowania termometrów szklanych zostały podpisane w grudniu 2004 roku w Obwodowym Urzędzie Miar we Włocławku. Wyniki wzorcowania zostały odniesione do państwowego wzorca jednostki miary poprzez zastosowanie termometrów szklanych cieczowych kontrolnych II rzędu. Wszystkie przyrządy sprawdzono w zakresie temperatury od -30 do +50°C. Niepewność pomiaru w całym zakresie temperatury dla przyrządów szklanych wynosiła $\pm 0,2^{\circ}\text{C}$. Korektę wskazań termometrów wprowadzano na bieżąco zgodnie z tabelą poprawek zawartą w świadectwach wzorcowania.

Wyniki pomiarów na stanowiskach polowych poddano analizie statystycznej przy pomocy pakietu oprogramowania STATISTICA 8.0 (Statsoft Inc. 2007). Wykorzystano podstawowe narzędzia do badania struktury zjawisk oraz ich współzależności. Wstępna analiza statystyczna wykazała iż uzyskane w doświadczeniu serie danych reprezentują populacje generalne o rozkładzie normalnym. Ocenę parametrów rozkładu wykonano przy użyciu testów parametrycznych. Średnie arytmetyczne każdego zbioru danych porównano przy pomocy *testu t*, hipotezę o równości wariancji weryfikowano przy użyciu *testu Levene'a* (StatSoft Inc. 2007, Luszniwicz i Słaby 2003, Snarska 2005). Przedział ufności dla średniej przyjęto na poziomie 0,05. W zakresie analizy współzależności wykorzystano moduły analizy korelacyjnej i regresyjnej. Średnia dobową temperaturę powietrza

obliczana była zgodnie z obowiązującym od 1996-01-01 wzorem Państwowej Sieci IMGW (okólnik Nr 2/SO/95 Dyrektora IMGW).

W obu metodach, automatycznej i manualnej, obliczenia względnego błędu dynamicznego wbd wyznaczono przy pomocy równania:

$$wbd = \frac{\Delta \vartheta_n}{\vartheta} = e^{-\frac{t}{\tau}}$$

gdzie: ϑ_n – temperatura czujnika; ϑ – temperatura powietrza; t – czas; τ – stała czasowa czujnika w warunkach ustalonych.

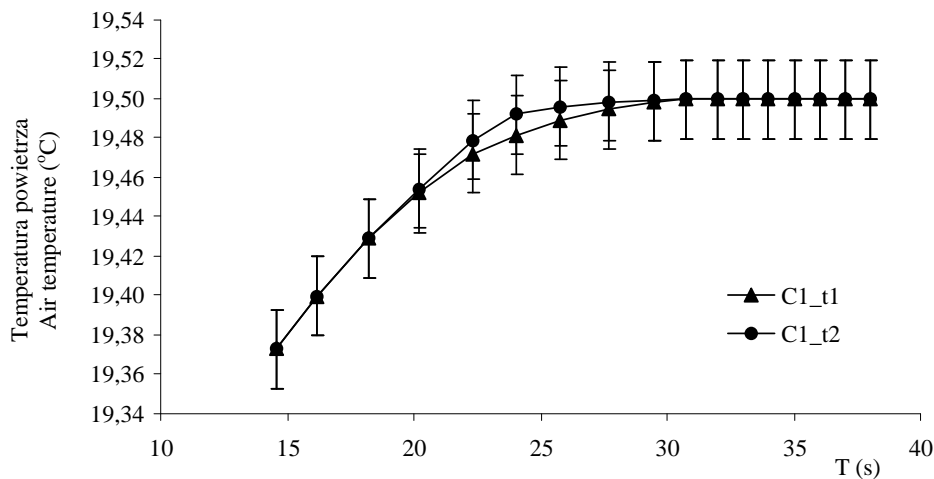
Przed rozpoczęciem doświadczenia przyjęto następujące założenia: błędy pobrania wynikające z niewystarczającej reprezentatywności stanowiska pomiarowego oraz niewystarczającej skuteczności osłon radiacyjnych przyjmują wartość 0,00. Błędy związane z samopodgrzewaniem, zmianami rezystancji linii telemetrycznych, oraz zmianami rezystancji w połączeniach instalacji wynoszą 0,00. Nie badano wpływu pasożytniczych sił termoelektrycznych i galwanicznych oraz obcych pól elektromagnetycznych. Jednostkowy przyrost temperatury powietrza wynosi maksymalnie $1,3^{\circ}\text{C}\cdot\text{h}^{-1}$ (Rożdżyński 2004). System zasilania układu pomiarowego oparto na niezależnym układzie akumulatorowo kondensatorowym.

WYNIKI

Zastosowany w doświadczeniu polowym układ pomiarowy oparty na mikrokontrolerze firmy *Microchip Technology* pozwolił na wykonanie serii pomiarów temperatury powietrza przy użyciu zestawu rezystancyjnych czujników temperatury. Czas pełnego cyklu akwizycji sygnału pomiarowego pochodzącego sześciu czujników temperatury wynosił $16,8\cdot 10^{-5}\text{s}$. W kategoriach meteorologicznych wynik ten należy uznać za pomiar jednoczesny. Test układu kondycjonowania potwierdził, iż w krótkim cyklu pomiarowym, za taki uznano CI_t1 , mikrokontroler jest w stanie nadzorować jednoczesny pomiar temperatury powietrza wykonywany jedenastoma czujnikami rezystancyjnymi, bez względu na to, jakiego użyjemy przetwornika analogowo-cyfrowego. W strukturze badanego układu zastosowano metodę przetwarzania napięcia typu SAR z kompensacją wagową. Uzyskano wysoki poziom konwersji z błędem wynoszącym $\pm 0,09\%$. Wynik ten jest zatem wyraźnie niższy od dopuszczalnego w meteorologii błędu pomiarowego dla temperatury powietrza.

W trakcie pracy rejestratora mikroprocesorowego układ kondycjonowania zgłosił błędy przetwarzania w obszarze zgodności charakterystyki czujników termometrycznych. Prawdopodobną przyczyną takiego zjawiska była różna prędkość przekazywania ciepła z powietrza atmosferycznego do czujnika. Wartości

błędów dynamicznych choć nie były duże, wyraźnie wskazują na różną szybkość reakcji czujników na skokową zmianę temperatury otoczenia. Można przypuszczać, iż spowodowane to było niejednakowym spadkiem poprzecznym temperatury w płaszczu ochronnym oraz w warstwach izolacyjnych termorezystorów. Fragment wykresu (w dużym powiększeniu) prezentujący reakcję termometrów elektrycznych ilustruje rysunek 1. Rozbieżności między czasem osiągnięcia wartości ustalonej wskazują na to, iż podawana przez producenta wartość nominalna stałej czasowej może różnić się od rzeczywistej. Test przeprowadzony w warunkach polowych wykazał, iż wartości stałej czasowej τ poszczególnych termometrów elektrycznych zawierały się w przedziale 27 do 32 sekund.



Rys. 1. Reakcja termometru elektrycznego t1 i t2 na zmianę temperatury powietrza w obszarze bliskim ustaleniu. C1_t1 średnia z cyklu, C1_t2 – wartość chwilowa

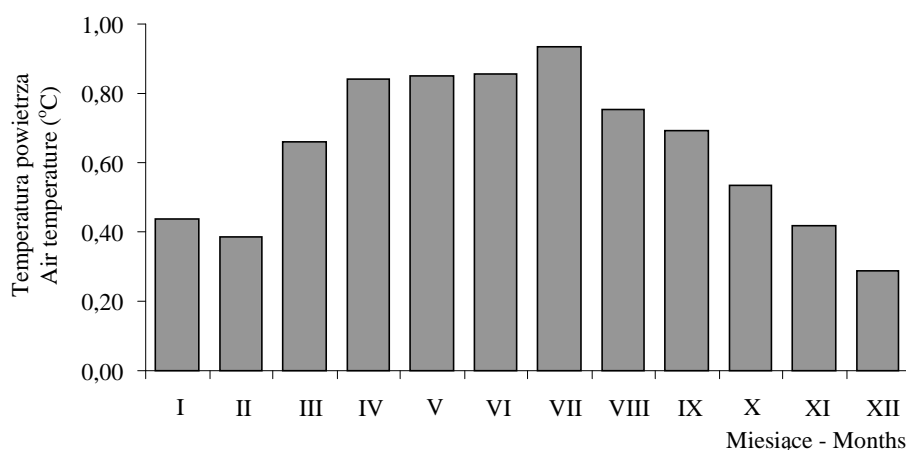
Fig. 1. Reaction of electric thermometer t1 and t2 to air temperature change in near stabilized status. C1_t1 the average from measurement cycle, C1_t2 – temporary value.

Okazuje się zatem, iż systematyczne błędy dynamiczne są nieuniknione, nawet wówczas jeśli spełniony jest warunek prawidłowej ekspozycji przyrządu. Błędy dynamiczne pojawiały się najczęściej w okresach skokowych zmian temperatury powietrza latem w godzinach popołudniowych: $\Delta\vartheta \leq 0,02^{\circ}\text{C}$, najrzadziej w warunkach stagnacyjnych, w chłodnej części roku: $\Delta\vartheta \leq 0,005^{\circ}\text{C}$.

Podobny test wykonano na różnych typach przyrządów. W tych samych warunkach błędy dynamiczne wynikające z różnej bezwładności cieplnej instrumentów cieczowych i metalowych osiągały wartości od $0,018^{\circ}\text{C}$ do $0,245^{\circ}\text{C}$. Szcze-

gólnie w drugim przypadku wartość błędu $\Delta \vartheta$ zbliżyła się do poziomu, przy którym średnie długookresowe mogą różnić się istotnie. Do zweryfikowania hipotezy o możliwej redukcji różnicy wskazań termometrów elektrycznych i cieczowych konieczna była analiza trendu temperatury w krótkich odstępach czasu. Jednostkowy przyrost temperatury powietrza, będący zmienną funkcji trendu omawianego elementu wynosił w ciągu roku średnio $0,65^{\circ}\text{C}\cdot\text{h}^{-1}$ (cykl C1_t1). Okresy w których notowano największe przyrosty temperatury to miesiące: czerwiec i lipiec. Najmniejsze przyrosty temperatury notowano w grudniu, średnia w tym miesiącu wyniosła zaledwie $0,28^{\circ}\text{C}$ (rys. 2).

W sytuacji ustalonej, w której wzrost temperatury następował ze średnią prędkością $0,65^{\circ}\text{C}/\text{h}$ obliczono, iż po upływie 3,8 minuty różnica wskazań między termometrem elektrycznym i termometrem stacyjnym wynosiła średnio $0,016^{\circ}\text{C}$ ($\pm 0,005^{\circ}\text{C}$).



Rys. 2. Średni przyrost temperatury powietrza w okresach jednogodzinnych miesięcznych serii pomiarowych 2007-01-01 do 2001-12-31

Fig. 2. Average increase of air temperature in one-hour periods for monthly measuring series from 2007-01-01 to 2001-12-31

Wartość błędu nie była stała i zmieniała się proporcjonalnie do szybkości zmian temperatury w jednostce czasu. Badanie różnicy wskazań między przyrządami w okresach zmian temperatury krótszej od 60 minut dało wyniki na poziomie pomijalnie niskim w stosunku do kryteriów obowiązujących w miernictwie meteorologicznym.

Po dokonaniu oceny sprawności układu sterowania i przetwarzania przystąpiono do części obliczeniowej. Wyniki pomiarów stabelizowano, a następnie przy

pomocy kwerendy krzyżowej przygotowano do analizy statystycznej. Badanie różnic pomiędzy wskaźnikami reprezentującymi serie pomiarowe termometrów rezystancyjnych wskazuje na dużą zgodność wyników w zakresie rozkładu czasowego i kierunku zmian okresowych.

W cyklach C1_t1, C2_t3 oraz C3_t5 wskaźniki uzyskane z uśrednienia (tzw. chwilowe wartości czasowe) różniły się od siebie przeciętnie o $0,013^{\circ}\text{C}$ ($\pm 0,008^{\circ}\text{C}$) w ciągu godziny. W dłuższych okresach czasu takich jak doba lub miesiąc różnice te pozostawały na tym samym poziomie. W cyklach pomiarowych, w których zastosowano termometry elektryczne o numerach t2, t4 i t6 uzyskano zbliżone wyniki (różnice przeciętnie $0,014^{\circ}\text{C}$) przy nieco wyższych wartościach średniej lecz podobnym odchyleniu standardowym. W kilku losowo wybranych seriach średnia ustalona w oparciu o surowe dane chwilowe była wyższa średnio o $0,01^{\circ}\text{C}$ od wartości średnich czasowych. Okazuje się zatem, iż w programie pomiarowym o krótkim kroku czasowym miary przeciętne szeregów rozdzielczych reprezentujących różne cykle pomiarowe były bardzo podobne (tab. 1 i 2).

Śledząc wyniki zawarte w tabeli 1 można również zauważyć, iż wraz ze zmniejszeniem liczności zbioru wzrasta błąd standardowy średniej populacji cząstkowej. Utrata części informacji na temat przebiegu temperatury w czasie, szczególnie wahań krótkookresowych, znajduje swoje odzwierciedlenie także w wartościach amplitudy. Wraz ze wzrostem liczności zbioru wzrasta prawdopodobieństwo zarejestrowania wartości odstającej od średniej wyznaczonej w wyniku analizy trendu.

Kolejnym etapem opracowania była ocena stopnia zgodności wskazań termometru elektrycznego i cieczowego w założonym programie pomiarowym. Średnia temperatura powietrza wyznaczona w oparciu o wskazania termometru stacyjnego była zawsze wyższa aniżeli ta uzyskana w pomiarze termorezystorem, jednakże odchylenie standardowe było we wszystkich przypadkach niższe. Reguła ta obowiązywała niezależnie od długości okresu w, którym wykonywano pomiar. W cyklu pomiarowym oznaczonym symbolem S2_t2 różnice osiągały wartość $0,12^{\circ}\text{C}$ przy pięciominutowym kroku czasowym. W przypadku pomiarów terminowych (cykl S1_t1) różnice wynosiły nawet $0,86^{\circ}\text{C}$. Przeprowadzony test miał na celu ocenę nadążania wskazań termometrów o różnych stałych czasu za kierunkowymi zmianami temperatury powietrza. Na rysunku 3 przedstawiono fragment serii pomiarowej termometru stacyjnego oraz termorezystora w warunkach powolnego spadku temperatury w sierpniowy dzień. Średnia temperatura powietrza wyznaczona w oparciu o pomiary terminowe metodą manualną znacznie odbiegała od wskaźników uzyskanych w seriach termometrów elektrycznych.

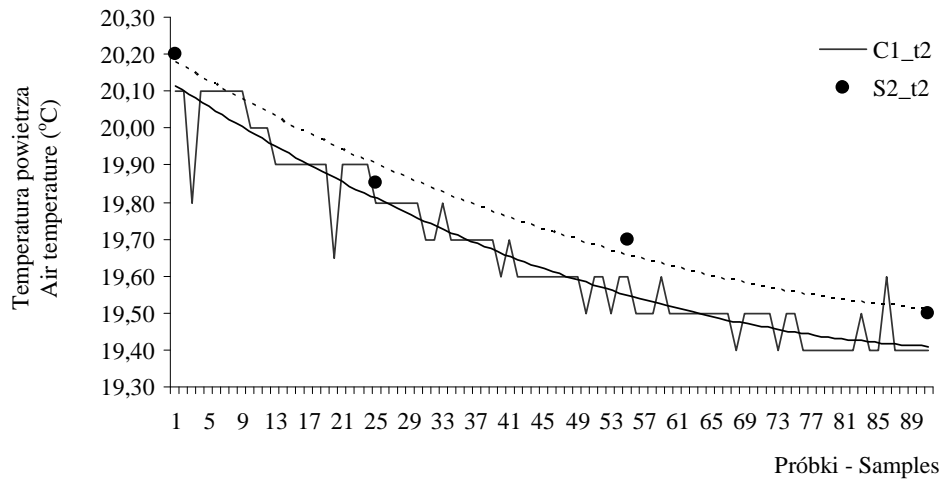
Tabela 1. Parametry rozkładu zmiennych w poszczególnych cyklach pomiarowych w czerwcu 2007
Table 1. Parameters of variable distribution in individual measuring cycles, June 2007

Cykl pomiarowy Measurement cycle	Liczność Size	Średnia Average	Odchylenie standardowe Standard deviation	Błąd standardowy średniej Standard error of average	Zakres Range
C1_t1	8760	15,831	3,979	0,140	18,941
C1_t2	8760	15,833	3,980	0,142	18,912
C2_t3	4380	15,832	3,981	0,141	18,911
C2_t4	4380	15,834	3,982	0,142	18,895
C3_t5	2920	15,834	3,982	0,142	18,913
C3_t6	2920	15,836	3,983	0,143	18,889

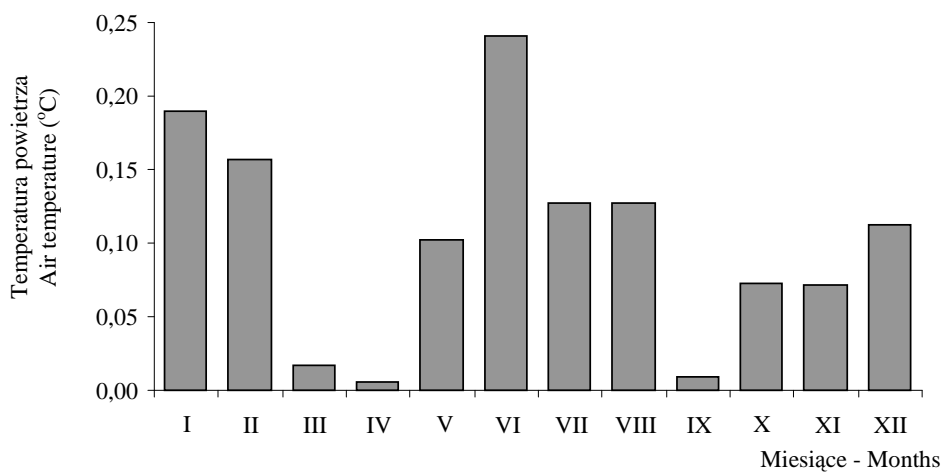
Tabela 2. Parametry rozkładu zmiennych w kolejnych cyklach pomiarowych w 2007 roku
Table 2. Parameters of variable distribution in individual measuring cycles, I-XII 2007

Cykl Pomiarowy Measurement cycle	Liczność Size	Średnia Average	Odchylenie standardowe Standard deviation	Błąd standardowy średniej Standard error of average	Zakres Range
C1_t1	105 120	6,618	8,480	0,103	43,630
C1_t2	105 120	6,620	8,483	0,109	42,919
C2_t3	52 560	6,620	8,485	0,111	42,277
C2_t4	52 560	6,620	8,484	0,112	42,176
C3_t5	35 040	6,620	8,481	0,112	43,099
C3_t6	35 040	6,621	8,485	0,113	43,023

W poszczególnych miesiącach różnice pomiędzy wskaźnikami w obu metodach zawierały się w przedziale od 0,52 do 1,65°C. Przykładowo, w czerwcu 2007 roku średnia z terminów klimatologicznych osiągnęła 17,49°C z odchyleniem 3,35°C (por. tab. 1). Zastosowanie filtra czasowego (synchronizacja) w macierzy danych cykli pomiarowych termorezystorów spowodowały jedynie niewielką redukcję błędów. Różnice w tym przypadku były nadal wysokie i wynosiły przeciętnie 0,69°C. Dopiero włączenie do analizy wyników pomiaru temperatury ekstremalnej spowodowało wyraźną poprawę oceny. Przeciętna różnica między wartościami wskaźników dobowych w obu metodach: automatycznej i manualnej, wyniosła przeciętnie 0,022°C ($\pm 0,009^\circ\text{C}$).



Rys. 3. Serie pomiarowe termometru stacyjnego i elektrycznego w krótkim cyklu integracji
Fig. 3. Measurement series of mercury and electric thermometers in short time cycle



Rys. 4. Różnice między średnimi miesięcznymi wartościami temperatury powietrza dla dwóch metod pomiaru: automatycznej i manualnej
Fig. 4. Differences between monthly air temperature averages for two methods of measurement: automatic and manual

Wartość różnicy uzależniona była od tempa zmian temperatury powietrza. Im tempo zmian było wyższe tym różnica była proporcjonalnie większa. Ta sama zależ-

ność pomiędzy wskaźnikami obliczonymi dla miesięcy wyniosła przeciętnie 0,11°C. Najniższa była w kwietniu 0,005°C najwyższa w czerwcu 0,241°C (rys. 4). Większą zgodność uzyskano wówczas, gdy serię danych cyklu automatycznego reprezentowała średnia arytmetyczna obliczona na podstawie dwóch wartości terminowych i dwóch ekstremalnych ($R^2 = 0,998$, $p < 0,01$) aniżeli średnia wartości godzinowych ($R^2 = 0,996$, $p < 0,01$). Średni błąd standardowy estymacji w pierwszym przypadku wyniósł 0,379°C a w drugim 0,405°C. Wartości miar przeciętnych zbiorów miesięcznych początkowo nie wskazywały na taki związek jednak analiza miar rozproszenia i wyniki testu Levene'a potwierdziły tę tezę (tab. 3).

Tabela 3. Parametry testu istotności Levene'a i współczynniki modelu regresyjnego ciągów danych zgromadzonych metodami automatyczną i manualną

Table 3. Parameters of Levene's test and regressive model coefficient for data sequences from manual and automatic methods

Seria Series	Liczność Size	F ($\sigma^2 - \sigma'^2$)/2	t-Levene'a F(1-df)	a	b	R ²	d'
T_min	730	1,01	0,027*	-0,304	1,000	0,992	0,616
T_max	730	1,00	0,002*	-0,650	0,996	0,995	0,607
T_06:00 GMT	730	1,18	2,970*	-0,552	0,910	0,981	1,029
T_12:00 GMT	730	1,00	0,002*	-0,438	0,991	0,988	1,004
T_18:00 GMT	730	1,15	1,910*	-0,051	1,064	0,990	0,850
Dies_term	730	1,00	0,004*	-0,384	0,995	0,997	0,360
Dies_godz	730	1,01	0,020*	-0,192	0,992	0,997	0,435
(Max+Min)/2	730	1,00	0,000*	-0,491	1,000	0,996	0,464

*- istotne statystycznie na poziomie $p = 0,05$, * - significance at $p = 0.05$; d' - błąd standardowy oceny, d' - estimation standard error.

Bardzo dobre rezultaty uzyskano w trakcie analizy zależności korelacyjnej wskaźników dobowych obliczonych w oparciu o wartości temperatury ekstremalnej. Okazało się bowiem, iż zarówno w przypadku cyklu pomiarowego rejestratora mikroprocesorowego jak i w metodzie manualnej średnia arytmetyczna wartości ekstremalnych (Max+Min)/2 daje wyniki w przybliżeniu zgodne ze średnią obliczoną wzorem obowiązującym w IMGW.

Na uwagę zasługują wyniki zamieszczone w tabeli 4, pozycja 2 (wyfłuszczone na ramka). Średnia roczna obliczona w oparciu o wskazania termometrów cieczowych różniła się od średniej wyznaczonej z wartości ekstremalnych zarejestrowanych przez stację automatyczną zaledwie o 0,05°C przy bardzo podobnych odchyleniach standardowych i jednorodnych wariancjach (statystyka F).

Tabela 4. Miary przeciętne oraz parametry testu istotności Levene'a dla zmiennych reprezentujących wartości średnie wyznaczone różnymi metodami**Table 4.** Statistical coefficients and parameters of Levene'a test for variables with represent averages determined with different methods

Serie – Series	Średnia Average	Odchylenie standardowe Standard deviation	F ($\sigma_1^2 - \sigma_2^2$)/2	t- Levene'a F(1-df)	p- Leve- ne'a
(Max+Min)/2_ automat	6,79	8,04			
(I+III+Max+Min)/4_ automat	6,43	8,03	1,007	0,002*	0,963
(Max+Min)/2_ automat	6,79	8,04			
(I+III+Max+Min)/4_ manual	6,84	8,05	1,005	0,011*	0,916
(Max+Min)/2_ automat	6,79	8,04			
(1/24 $\sum x_i$)_ automat	6,61	8,02	1,003	0,001*	0,974
(Max+Min)/2_ automat	6,79	8,04			
(Max+Min)/2_ manual	7,28	8,03	1,001	0,000*	0,995
(Max+Min)/2_ manual	7,28	8,03			
(I+III+Max+Min)/4_ manual	6,84	8,05	1,009	0,013*	0,906

*istotne statystycznie na poziomie $p = 0,05$ – significance at $p = 0.05$.

DYSKUSJA

Wykorzystanie nowoczesnych rozwiązań technologicznych w meteorologii pozwala na stosowanie układów przystosowanych do pracy w dowolnych konfiguracjach cyklu pomiarowego. Istotną rolę w tym zakresie pełnią programowalne układy wyjścia na poziomie autonomicznego rejestratora, dzięki którym można modyfikować standardowe ustawienia systemu, wprowadzać własne algorytmy oraz formułować instrukcje. Możliwość tę wykorzystano w opisanym doświadczeniu polowym z użyciem wielu urządzeń pracujących w niezależnych cyklach pomiarowych. Rozwiązanie takie w pełni odpowiada cechom pożądanym w najnowszych systemach meteorologicznych, daje również gwarancję przeprowadzenia rzetelnego eksperymentu (Meyer i Hubbard 1992, Elliot i in.1994, Durło 2004, Rożdżyński 2004).

Do bardzo ważnych cech mikroprocesorowego układu pomiarowego należy także zaliczyć możliwość wykonywania testów diagnostycznych oraz kontrolę jakości pomiarów. W przeprowadzonym doświadczeniu system kontroli stanu stacji umożliwił wykonanie testu zgodności charakterystyk poszczególnych termorezystorów w czasie ich pracy na stanowisku polowym. Jeszcze do niedawna, wykonanie takiej czynności możliwe było jedynie w laboratorium meteorologicznym. Podobnie, rzecz dotyczy gromadzenia informacji o stanie technicznym stacji

i jej podzespołów. Dzięki najnowszym rozwiązaniom telemetrycznym i teletechnicznym pracę automatycznej stacji można nadzorować zdalnie co znacznie skraca czas poświęcony na kontrolę, szczególnie w przypadku odległych stanowisk oraz ułatwia diagnozę ewentualnej przyczyny awarii układu pomiarowego (Gajda 1988, Krzyżanowski 2004, Rożdżyński 2004).

Opisując zalety automatycznej stacji meteorologicznej nie sposób pominąć roli jaką pełni w niej blok sterowania i przetwarzania. W przeprowadzonych badaniach zastosowano sześć czujników temperaturowych współpracujących z jednostką sterującą zgodnie z zadaniem harmonogramem pomiarowym. Synteza wyników potwierdziła, iż nawet przy bardzo krótkim czasie próbkowania mikrokontroler jest w stanie nadzorować jednoczesny pomiar temperatury przy użyciu bardzo dużej liczby czujników, bez konieczności wykonywania korekty czasowej. Dokładna analiza funkcjonowania rejestratora meteorologicznego firmy Spectrum Technologies dostarczyła wielu cennych wskazówek na temat możliwości konfiguracji i organizacji systemu pomiarowego w kontekście problematyki porównywalności wyników uzyskanych przyrządami elektrycznymi i cieczowymi. Istotne w tym względnie wydaje się poszukiwanie kompromisu pomiędzy czasem próbkowania i czasem integracji. Standardową funkcją bloku sterowania rejestratorów meteorologicznych jest program kontroli tolerancji wyniku mający na celu usunięcie ze zbioru danych tych wartości, które obciążone są dużym błędem przypadkowym a także odrzucenie wartości ekstremalnych w okresie uśredniania (McGee 1988, Michalski i in. 2001) Określenie przedziału prawdopodobnego rozrzutu wyników możliwe jest tylko wówczas jeżeli przeprowadzona zostanie analiza wpływu stałej czasowej czujnika na skokową zmianę temperatury. Wyniki uzyskane w niniejszej pracy potwierdzają istotną rolę błędów dynamicznych w pomiarach temperatury powietrza. Zarówno w literaturze krajowej jak i zagranicznej kryterium $t > 3\tau$ jest często uznawane, jako minimum konieczne do spełnienia warunku porównywalności czasu reakcji różnych przyrządów, spotykana jest również wartość $t \geq 5\tau$ (McGee 1988, Rożdżyński 2004) Oznacza to, że wynik uzyskany w niniejszej pracy tj. $t = 228s$, przy średniej prędkości zmian temperatury $0,65^\circ C/h$, należy uznać za prawidłowy, zawiera się bowiem w przytoczonym powyżej przedziale.

Interpretując wyniki porównania przyrządów elektrycznych i cieczowych należy w pierwszej kolejności zwrócić uwagę na fakt, iż wraz ze skróceniem czasu próbkowania maleje błąd standardowy średniej, zmniejsza się również wariancja. Cykl C1_t1 można uznać za wyjątkowo szybki, lecz w tym przypadku ryzyko utraty części informacji na temat przebiegu temperatury jest stosunkowo niewielkie. Znajduje to swoje potwierdzenie w wartościach rozstępu podanych w tabelach 1 i 2. Na tym etapie istotne wydaje się zwrócenie uwagi na zagadnienie dotyczące zgodności wskazań różnych przyrządów w tym samym momencie wykonania

nia pomiaru. Z założenia, wyniki te powinny być identyczne, niestety w rzeczywistości tak nie jest, nawet wówczas, gdy dysponujemy wysokiej jakości przyrządami. Na problem ten zwracają uwagę autorzy prac poświęconych jakości danych meteorologicznych między innymi Kejna i Kowalskowska-Uscka (2006) Lorenc (2006) oraz Budzik i Marszał (2006). Niestety, w cytowanych opracowaniach nie można odnaleźć danych na temat poziomów błędów systematycznych zarówno tych znanych jak i nieznanymi, czy też błędów przypadkowych. To uzasadnia konieczność podjęcia próby wyjaśnienia roli błędów przetwarzania, na przykładzie stałej czasu czujnika, na jakość danych uzyskanych w procesie pomiarowym.

Wyniki uzyskane w cyklach pomiarowych termometrów o numerach t2, t4 oraz t6 na tle danych zgromadzonych termometrem stacyjnym wykazują dość wyraźne różnice. W terminie porannym 06:00 GMT wskazania termometru cieczowego były przeciętnie o $0,63^{\circ}\text{C}$ ($\pm 1,0^{\circ}\text{C}$) wyższe od wskazań termorezystora, w terminie południowym 12:00 GMT były również wyższe ale tym razem o tylko $0,55^{\circ}\text{C}$ ($\pm 1,0^{\circ}\text{C}$), natomiast w terminie wieczornym były niższe od wskazań termometru elektrycznego; różnica wynosiła w tym przypadku $0,15^{\circ}\text{C}$ ($\pm 1,0^{\circ}\text{C}$). Zgodność odchyleń standardowych potwierdza, iż metodycznie eksperyment został wykonany poprawnie, zaistniały zatem inne okoliczności, których nie udało się w pracy wyjaśnić. Prawdopodobną przyczyną mogą być błędy termorezystora np. błąd przybliżenia charakterystyki lub błędy związane z rezystancją przewodów linii telemetrycznych.

Ustalono jednocześnie, iż wartości uzyskane w procedurze uśredniania dla cykli pomiarowych termometrów t1, t3 i t5 dawały znacznie mniejsze różnice przy zachowaniu podobnych proporcji, przeciętnie wynosiły one $-0,16^{\circ}\text{C}$ z odchyleniem $0,4^{\circ}\text{C}$. W literaturze problem ten opisywany jest w zakresie charakterystyk meteorologicznych wartości chwilowych. Naturalna, dynamiczna zmienność warunków atmosferycznych, na którą zwracają uwagę autorzy prac, powoduje konieczność wprowadzenia procesu uśredniania, tak aby zredukować niepewność pomiaru. Z tego właśnie powodu tak ważną rolę w procesie pomiarowym pełnią bloki sterowania i przetwarzania automatycznych stacji meteorologicznych.

Stajemy przed ogromnym wyzwaniem, jakie niesie ze sobą automatyzacja pomiarów meteorologicznych. Można postawić sobie pytanie, czy współczesny meteorolog to specjalista w zakresie systemów pomiarowych, telemetrycznych i informatycznych? Wydaje się, iż bez tej wiedzy, dalsze zgłębianie nauki w zakresie meteorologii, a szczególności pomiarów precyzyjnych nie jest możliwe. Uzyskane wyniki stanowią przesłankę do prowadzenia badań na temat różnych sposobów uśredniania temperatury, a co za tym idzie poszukiwania rozwiązań w zakresie optymalnej konfiguracji meteorologicznych układów pomiarowych.

WNIOSKI

1. Możliwa jest redukcja błędu wynikającego z różnej bezwładności cieplnej termometrów elektrycznych i cieczowych do wielkości mniejszej od $0,02^{\circ}\text{C}$ przy zastosowaniu programu pomiarowego o odpowiednim okresie próbkowania i dostosowanym do niego czasie integracji.

2. Przy wyznaczaniu średniej dobowej temperatury powietrza w oparciu o wartości ekstremalne próbkowanie termometrem rezystancyjnym powinno odbywać się w równych odstępach czasu wynoszących maksymalnie $\frac{1}{2}$ stałej czasowej τ urządzenia.

3. Prawdopodobieństwo wystąpienia błędów dynamicznych w całym zakresie temperatury powietrza jest równe 1. Różnice wskazań termometru stacyjnego i elektrycznego wynikające z różnej bezwładności cieplnej przyrządów w warunkach stagnacyjnych wynoszą średnio $0,018^{\circ}\text{C}$, w warunkach szybkich zmian temperatury powietrza osiągają $0,25^{\circ}\text{C}$.

4. Zmiana metody pomiaru temperatury powietrza z manualnej na automatyczną nie musi pociągać za sobą zerwania jednorodności ciągu klimatologicznego przy spełnieniu koniecznych warunków prawidłowej ekspozycji przyrządu pomiarowego i dokładnej analizy błędów pobrania.

5. Możliwa jest zmiana dotychczasowej formuły wyznaczania średniej dobowej temperatury powietrza wg wzoru obowiązującego w państwowej sieci IMGW na wskaźnik wyznaczony jako średnia arytmetyczna temperatury dobowej maksymalnej i minimalnej.

PIŚMIENNICTWO

- Bil-Knozowa G., Ronovsky J. 2006. Comparison of a series of air temperature and relative air humidity measured using HOBO and AMS sensors and conventional methods. *Ann. UMCS*, 61, 72-81.
- Budzik T., Marszał M. 2006. Porównanie temperatury powietrza w klatce meteorologicznej i osłonie antyradiacyjnej na przykładzie pomiarów w Sosnowcu w 2003 roku. *Ann. UMCS*, 61, 107-115.
- Durło G. 2001. Porównanie wyników pomiarów standardowych i automatycznej stacji meteorologicznej na Kopciowej w Krynicy. (W:) Mrugała S. (red.) *Problematyka pomiarów i opracowań elementów meteorologicznych*. Wyd. UMCS, ISBN 83-227-1803-9, 33-42.
- Durło, G. 2004. Microclimatic and bioclimatic valorization, methods of research. In Partyka J., editor. *The diversification and transformation of natural and cultural environment of the Kraków-Częstochowa Upland*. DEKA Publishers, 1, 157-164.
- Durło, G., Wilczyński, S., Feliksik, E. 2005. The role of forest measurement stations in climatological investigations. (In:) Krzemień, K., editor. *The role of field meteorological station in geographical research*. Monogr. IGiGP UJ, 1, 179-187.
- Elliott, R. L., Brock, F. V., Stone, M. L., Harp, S. L., 1994. Configuration decisions for an automated weather Station network. *Applied Engineering in Agriculture*, 10, 45-51.
- Gajda J. 1998. Modelowanie i badania symulacyjne systemów pomiarowych. Wyd. Jartek S.C., Warszawa, 1-411.

- Kejna M., Kowalkowska-Uscka J. 2006. Porównanie wyników pomiarów meteorologicznych w Stacji ZMŚP w Koniczynie (Pojezierze Chełmskie) wykonanych metoda tradycyjną i automatyczną w roku hydrologicznym 2002. *Ann. UMCS*, 61, 208-217.
- Krzyżanowski R. 2004. Układy mikroprocesorowe. Wyd. Mikom, ISBN: 83-7279-450-2, 1-252.
- Lorenc H. 2006. Ocena jakości danych meteorologicznych po wprowadzeniu automatycznych przyrządów rejestrujących do sieci IMGW. *Ann. UMCS*, 61, 256-266.
- Luszniewicz A., Słaby T. 2003. Statystyka, teoria i zastosowania. Wyd. C.H. Beck Warszawa. ISBN 83-7247-798-1, 1-446.
- Łabędzki L., Rogulski W., Kasperska W. 2001. Ocena pomiarów meteorologicznych prowadzonych stacją automatyczną. *Prz. Nauk. Inż. i Kszt. Środ..SGGW* 21, 195-201.
- McGee T. 1988. Principles and methods of temperature measurement. Wiley-IEEE, ISBN 9780471627678, 1-581.
- Mazurczyk W., Wierzbicka A., Goc K. 2001. Porównanie pomiarów meteorologicznych uzyskanych metoda tradycyjną oraz za pomocą automatycznej stacji Campbella. (W:) Mrugała S. (red.) Problematyka pomiarów i opracowań elementów meteorologicznych. Wyd. UMCS, ISBN 83-227-1803-9, 67-74.
- Meyer, S. J., Hubbard, K. G. 1992. Nonfederal automated weather stations and networks in the United States of Canada: a preliminary survey. *Bull. Am. Meteor. Soc.*, 73/4, 449-457.
- Michalski L., Eckersdorf K., Kucharski J., McGhee J. 2001. Temperature measurement. John Wiley & Sons, Ltd. ISBN: 9780471867791, 1-478.
- Rojek M., Rojek M. S. 2000. Porównanie temperatury i wilgotności powietrza mierzonych przy wykorzystaniu klasycznej i automatycznej stacji meteorologicznej. *Rocz. Nauk. AR Poznań, Ser. Melior.*, 239/21, 59-67.
- Rojek M., Rojek M. S., Łomotowski J. 2001. Porównanie danych meteorologicznych uzyskiwanych przy wykorzystaniu klasycznej i automatycznej stacji meteorologicznej. *Annales UMCS*, 60/61: 299-307.
- Rożdżyński, K. 2004. Podstawy telemetrycznego miernictwa meteorologicznego. *Monogr. IMGW*, 1, 1-478.
- Snarska A. 2005. Statystyka, ekonometria, prognozowanie. Wyd. Placet, Warszawa, ISBN 83-85428-97-6, 1-262.
- StatSoft, Inc. 2007. STATISTICA (data analysis software system), version 8.0. www.statsoft.com.



KAPITAŁ LUDZKI
NARODOWA STRATEGIA SPÓJNOŚCI

Projekt jest współfinansowany ze środków Unii Europejskiej – Europejskiego Funduszu Społecznego oraz budżetu Województwa Dolnośląskiego w ramach Programu Operacyjnego Kapitał Ludzki.

THE TECHNOLOGICAL FACTOR IN AUTOMATIC METEOROLOGICAL STATIONS

Grzegorz Benedykt Durło¹, Joanna Kajewska²

¹Department of Forest Protection and Forest Climatology, Faculty of Forestry,
Agricultural University
Al. 29 Listopada 46, 31-425 Kraków
e-mail: rldurlo@cyf-kr.edu.pl

²Department of Meteorology and Hydrology,
Institute of Environmental Development and Protection,
Wrocław University of Environmental and Life Sciences
Plac Grunwaldzki 24, 71-353 Wrocław

Abstract. The paper presents the results of investigations relating to the utilization of resistor sensors in synchronic measurements of air temperature. The data come from an experimental field located in the Forest Division of Wisła, Beskid Śląski Mts. The analysis comprised the valuation of a few elements. The first of them concerned the control and conversion efficiency of the microcontroller set. The second concerned the values of dynamic errors in different types of measuring equipments. The last one concerned the investigation of the dependence of automatic and manual temperature measurements. The results of this study showed the dominant role of temperature measurements precision, fulfilled the time constant of thermometer and testing period. It is possible to reduce the error resulting from the different thermal inertia of the electric and fluid thermometers below value of 0.02°C. The occurrence probability of dynamic errors in the whole range of air temperature is 1. The differences between the liquid and electric thermometer indications resulting from different thermal inertia were 0.018°C on average in stagnation and 0.25°C in quick changing air temperature conditions. The change of measurement method of air temperature from manual to automatic does not need to break the homogeneity of climatologic series.

Keywords: automatic meteorological station, air temperature, dynamic error, thermoresistor